

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta strojní



## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Studium problematiky stárnutí povrchů vybraných  
geopolymerních materiálů**

**Study of aging of selected surfaces  
geopolymer materials**



**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 3911R018 Materiály a technologie  
Zaměření: Materiálové inženýrství

**Studium problematiky stárnutí povrchů vybraných  
geopolymerních materiálů**

**Study of aging of selected surfaces  
geopolymer materials**

**KMT – B – 172**

**Pavel Láník**

Vedoucí práce: doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D.

Konzultant: Ing. Nguyen Thang Xiem  
Ing. Hung Tran Doan

**Rozsah práce:**

počet stran textu: 104  
počet obrázků: 49  
počet tabulek: 56  
počet grafů: 11  
počet příloh: 4

**Datum: 16.5.2011**



**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta strojní**

---

Katedra materiálu

Studijní rok: 2010/2011

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Jméno a příjmení: **Pavel Láník**

Studijní program: **2341 B Strojírenství**

Obor: **Materiály a technologie**

Zaměření: **Materiálové inženýrství**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje  
bakalářská práce na téma:

### **Studium problematiky stárnutí povrchů vybraných geopolymerních materiálů**

#### **Zásady pro vypracování:**

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznamte se s vlastnostmi geopolymerních materiálů a možnostmi jejich využití.
2. Připravte vzorky a vyberte vhodné způsoby k hodnocení jejich povrchového stárnutí.
3. Popište a zhodnoťte získané výsledky.
4. Zformulujte závěry.

Forma zpracování bakalářské práce:

- průvodní zpráva v rozsahu 25 - 40 stran

- přílohy

Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu):

- [1] DAVIDOVITS, J. 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs. Geopolymer 2002 Conference, October 28-29 2002, Melbourne, Australia
- [2] DAVIDOVITS, J. DAVIDOVITS, M. Composite Materials with Geopolymer Matrix. Geopolymer '88, Vol. 2, pp. 325-337.
- [3] DAVIDOVITS, J. Geopolymer of Chemistry and Properties. Geopolymer '88, Vol. 1, pp. 25-48
- [4] DAVIDOVITS, J. Geopolymer of geopolymeric systems, terminology. Géopolymère'99 Proceedings, pp. 9-40
- [5] JASZICEK, M. Hodnocení fyzikálních vlastností kompozitních systémů s geopolymerní maticí. Diplomová práce TUL, 2009.
- [6] HUNG, T. D., LOUDA, P., KROISOVÁ, D., BORTNOVSKY, O., BEZUCHA, P. Mechanical Properties of Geopolymer Composite Systems Curing at Ambient Condition. In: 16<sup>th</sup> International Conference on Structure and Structure Mechanics of Textile Fabrics, Faculty of Textile Engineering, TUL, Liberec, 3-4 December 2009.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Nguyen Thang Xiem  
Ing. Hung Tran Doan

L.S.

prof. Ing. Petr LOUDA, CSc.  
vedoucí katedry

doc. Ing. Miroslav MALÝ, CSc.  
děkan

V Liberci dne 13. 10. 2010



## **ANOTACE**

### **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

FAKULTA STROJNÍ: KATEDRA MATERIÁLU

Studijní program: 2341 B – Strojírenství  
Obor: 3911R018 Materiály a technologie  
Zaměření: Materiálové inženýrství  
Bakalář: Pavel Láník  
Číslo BP: KMT – B – 172  
Vedoucí práce: doc. Ing. Dora Kroisová, Ph.D.  
Konzultant: Ing. Nguyen Thang Xiem, Ing. Hung Tran Doan  
Téma: **Studium problematiky stárnutí povrchů vybraných geopolymerních materiálů**  
**Study of aging of selected surfaces geopolymer materials**

#### **ANOTACE:**

Bakalářská práce pojednává o vybraných geopolymerních materiálech, u kterých se zabýváme problematikou stárnutí odlitých a obrobených povrchů (broušený, frézovaný) v odlišných prostředích (vzduch, voda a destilovaná voda).

Úvodní část se zabývá geopolymerními materiály a plnivý (různé druhy popílku, kámen, lupek) pro výrobu kompozitů z daných plniv, technologií výroby, vlastnostmi, přehledem všech možných měření a pozorování. Dále jejich postupným zpracováním a vyhodnocením.

Závěr práce je zhodnocení, posouzení výsledků a doporučení užití vybraných geopolymerních materiálů.

#### **ABSTRACT:**

The Bachelor's thesis deals with selected geopolymer materials, which deals with the aging of the cast and machined surfaces (grinding, milling) in different environments (air, water and distilled water).

The introduction deals with geopolymer materials and fillers (various types of fly ash, stone, shale) for the manufacture of composites with these fillers, a production technology, properties, listing all the possible measurements and observations. Furthermore, a gradual processing and an evaluation.

The conclusion is an evaluation, assessment results and recommendations of use of selected geopolymer materials.

#### **KLÍČOVÁ SLOVA**

Geopolymer  
Degradace povrchu  
Popílek  
Kámen  
Lupek  
Geopolymerní kompozit

#### **KEY WORDS**

Geopolymer  
Degradation of surface  
Fly ash  
Stone powder  
Shale  
Geopolymer composite

## PROHLÁŠENÍ

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultanty.

Datum:

Podpis:

**Poděkování:**

*Srdečně děkuji doc. Ing. Doře Kroisové, Ph.D. za veškerou její ochotu, podporu a pomoc při tvorbě této práce. Mé poděkování patří také Ing. Nguyen Thang Xiemovi a Ing. Hung Tran Doanovi za cenné pokyny a čas, který mi věnovali při práci v laboratořích. Dále chci poděkovat Ing. Pavlu Kejzlarovi a Martinu Kordíkovi.*

## Přehled použitých symbolů a zkratek

<b>H<sub>2</sub>O</b>	<i>ang. Water</i>	Voda
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<i>ang. Aluminium oxide</i>	Oxid hlinitý (korund)
<b>KOH</b>	<i>ang. Potassium hydroxide</i>	Hydroxid draselnatý
<b>NaOH</b>	<i>ang. Sodium hydroxide</i>	Hydroxid sodný
<b>PS</b>	<i>ang. Polysialate</i>	Polysialát
<b>PSS</b>	<i>ang. Poly (sialate-siloxo)</i>	Poly (siloxo-sialát)
<b>SEM</b>	<i>ang. Scanning electron microscopy</i>	Skenovací elektronová mikroskopie
<b>EDX</b>	<i>ang. Energy-dispersive X-ray spectroscopy</i>	Energicko-disperzní X-ray spektroskopie
<b>BR</b>	<i>ang. Grinded surface</i>	Broušený povrch
<b>HR</b>	<i>ang. Milled surface</i>	Frézovaný povrch
<b>OD</b>	<i>ang. Cast surface</i>	Odlitý povrch
<b>HV</b>	<i>ang. Vickers hardness</i>	Tvrdost Vickerse
<b>HL</b>	<i>ang. Leeb hardness</i>	Tvrdost Leebe
<b>HB</b>	<i>ang. Brinell hardness</i>	Tvrdost Brinella
<b>HS</b>	<i>ang. Shore hardness</i>	Tvrdost Shora
<b>HRA</b>	<i>ang. Rockwell hardness-method A</i>	Tvrdost Rockwella-metoda A
<b>HRB</b>	<i>ang. Rockwell hardness-method B</i>	Tvrdost Rockwella-metoda B
<b>HRC</b>	<i>ang. Rockwell hardness-method C</i>	Tvrdost Rockwella-metoda C
<b>T [°C]</b>	<i>ang. Celsius temperature</i>	Teplota Celsia
<b>ρ [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<i>ang. Density</i>	Hustota
<b>W [mm]</b>	<i>ang. Width</i>	Šířka
<b>D [mm]</b>	<i>ang. Depth</i>	Hloubka
<b>L [mm]</b>	<i>ang. Lenght</i>	Délka
<b>m [g]</b>	<i>ang. Weight</i>	Hmotnost
<b>WDX</b>	<i>ang. Wavelength-dispersive X-ray spectroscopy</i>	Vlnově-disperzní X-ray spektroskopie
<b>VO</b>	<i>ang. Water</i>	Voda
<b>D. VO</b>	<i>ang. Distilled water</i>	Destilovaná voda
<b>VZ</b>	<i>ang. Air</i>	Vzduch

## OBSAH

<b>1. Úvod .....</b>	<b>10</b>
<b>2. Geopolymer .....</b>	<b>11</b>
2.1. Vytvrzování geopolymery, geopolymeryce.....	12
2.2. Struktura geopolymery .....	13
2.3. Kompozity s geopolymerní maticí .....	14
2.4. Aplikace geopolymery v průmyslu.....	15
<b>3. Experimentální část .....</b>	<b>18</b>
3.1. Volba složení vzorků .....	18
3.1.1. Chemické složení vybraných plniv .....	19
3.2. Druhy použitých forem a jejich užití.....	20
3.3. Technologie výroby vzorků.....	22
3.4. Složení vybraných geopolymerních vzorků s různými typy plniv.....	26
3.4.1. Vzorky vytvrzované při 60°C po 24 hodin.....	26
3.4.2. Vzorky vytvrzované při laboratorní teplotě 20°C po 6 až 7 dní .....	29
3.5. Měření rozměrů .....	37
3.6. Měření hmotnosti.....	37
3.7. Měření tvrdosti.....	38
3.7.1. Princip měření Leeb tvrdosti (dynamická metoda) .....	39
3.8. Výpočet hustoty a smrštění.....	40
3.9. Pozorování povrchu pod optickým mikroskopem.....	41
3.10. Výsledky měření po dobu zrání geopolymerního kompozitu .....	41
3.10.1. Vzorky vytvrzované při 60°C po 24 hodin .....	41
3.10.2. Vzorky vytvrzované při laboratorní teplotě 20°C po 6 až 7 dní.....	44
3.11. Výsledky měření v degračním prostředí.....	53
3.11.1. Příprava vzorků do degračního prostředí a jejich měření .....	53
3.11.2. Vzorky vytvrzované při 60°C po 24 hodin .....	53
3.11.3. Vzorky vytvrzované při laboratorní teplotě 20°C po 6 až 7 dní.....	63
<b>4. Diskuse a shrnutí výsledků .....</b>	<b>83</b>
<b>5. Závěr .....</b>	<b>87</b>
<b>6. Seznam obrázků a tabulek.....</b>	<b>89</b>
<b>7. Použitá literatura .....</b>	<b>94</b>
<b>8. Přílohy .....</b>	<b>94</b>
8.1. Grafy s průběhy tvrdostí v odlišných prostředích .....	95
8.2. Geopolymer FC-1 .....	102
8.3. Barva povrchů po vysušení.....	103
8.4. Doplnující fotodokumentace + elektronická podoba práce.....	104

## 1. Úvod

Geopolymery jsou poměrně nové materiály, které jsou v mnoha oblastech neprozkoumány. Vznikly v roce 1970, po mohutných požárech ve Francii. Bylo potřeba nalézt materiál, který bude svou pevností, hustotou a cenou odpovídat plastům a zároveň bude nehořlavý a tepelně odolný [1, 2].

Joseph Davidovits v roce 1978 přichází po důkladném zkoumání syntézy fenolických plastů a také zeolitů s nápadem použít tyto minerály k výrobě nové skupiny minerálních pojiv a polymerů. Výsledkem byly amorfní nebo částečně krystalické třídimenzionální struktury hlinitokřemičitanu, nazvané "geopolymery", i když podobný materiál byl vyvíjen již v Sovětském svazu od roku 1950 pod názvem "grutocementy" [2, 3].

Výrobní procesy vyžadují zkondenzované alkálie, vysoké hodnoty pH a teploty probíhající procesů (polykondenzace) pod 150°C za normálního tlaku. K výrobě geopolymerních materiálů není tedy potřeba tak vysoká teplota, jako při výrobě keramického materiálu. Geopolymerní materiály vznikají polykondenzací jako organické polymery [1, 2].

Tyto nové materiály jsou užívány jako čisté nebo matrice kompozitu a nachází využití v mnoha oblastech průmyslu. Čistý materiál se využívá k zapouzdření radioaktivního materiálu nebo jedovatých chemikálií. Přidává se jako pojivo do speciálních betonů nebo matrice kompozitu k výrobě forem a nástrojů ve zpracovatelském průmyslu hliníku. Mnoho dalších aplikací by se dalo najít v automobilovém, leteckém a kosmickém průmyslu a ve stavebnictví atd. [1, 2].

Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	1500
Modul pružnosti [GPa]	14
Mez pevnosti v ohybu [MPa]	130
Tepelná odolnost [°C]	1000
Cena [\$/kg]	2

Tab. 1.1. Základní obecné vlastnosti geopolymerních materiálů [1].

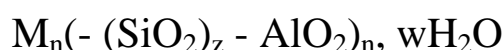
Každý nový materiál se musí důkladně prozkoumat ve specifickém odvětví průmyslu, aby se zjistilo, zda vyhovuje v dané oblasti nebo naopak nevyhovuje. Po důkladném prozkoumání všech vlastností daného materiálu můžeme určit nejvhodnější průmyslové využití.

**Tématem této práce je sledování stárnutí povrchu vybraných geopolymerních materiálů.** Ze získaných měření (pozorování) zjistíme, jak se daný povrch vybraných geopolymerních materiálů mění v různých prostředích.

## 2. Geopolymer

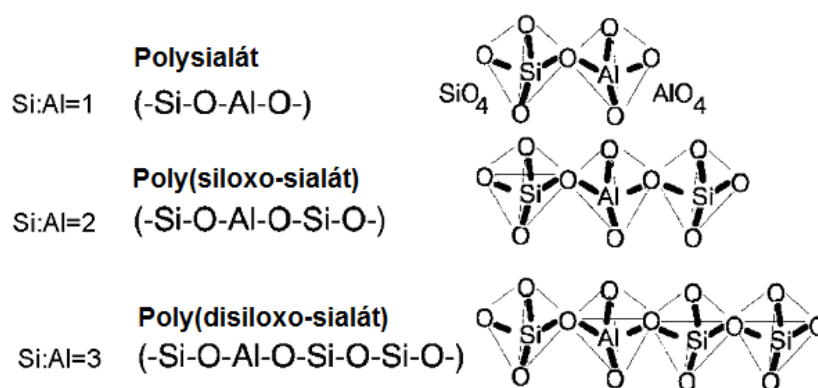
Tento název "geopolymer" byl navržen tvůrci polymeru, který je založený na hlinitokřemičitanech jako polysialát (ang. polysialate). Sialáty se skládají z tetraedrů  $\text{SiO}_4$  a  $\text{AlO}_4$  se střídavě spojenými atomy kyslíku, dohromady tvoří tzv. síť. Síť musí obsahovat ionty s kladnými náboji, jako jsou  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ , aby vyrovnávaly náboj iontů hliníku  $\text{Al}^{3+}$  v tetraedrické koordinaci [1, 2].

Polysialáty mají empirický vzorec:



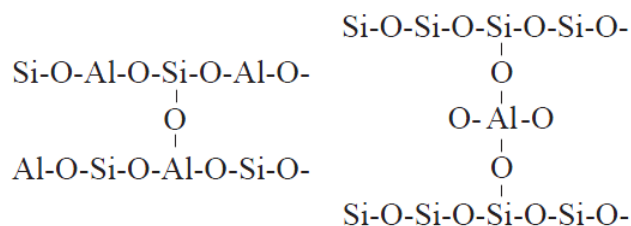
kde "z" je přirozené číslo (1, 2, 3, atd.), "M" stanoví jednomocný kation, draslík nebo sodík, "n" představuje stupeň polymerizace [1, 2].

Rozlišujeme tři základní druhy polysialátů:



Obr. 1. Příklady polysialátů a schéma molekulární struktury [1].

Polysialáty jsou řetězcovými polymery, ve kterých jsou atomy hliníku  $\text{Al}^{3+}$  a křemíku  $\text{Si}^{4+}$  v tetraedrickém uspořádání s atomy kyslíku. Jejich struktura se mění z amorfnní do částečně krystalické. Mohou také vytvářet vazby mezi polymerním řetězcem, to se označuje jako síťující prvek. Zesíťování může proběhnout tehdy, když je poměr atomů křemíku a hliníku v síti geopolymery větší než 2 [1, 4].



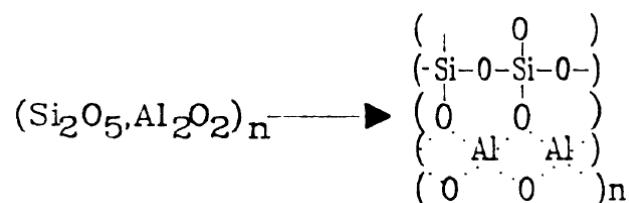
Obr. 2. Zesíťované řetězce geopolymery [4].

## 2.1. Vytvrzování geopolymery, geopolymery

Geopolymerní materiály podléhají polykondenzaci. Vytvrzování trvá několik hodin při teplotě 30°C, několik minut při teplotě 85°C a několik vteřin při použití mikrovln. Jedná se o materiály vyrobené za podobných podmínek jako plasty, ale s vlastnostmi podobnými keramickým materiálům [1, 2].

Jeden z hlavních mechanismů vzniku geopolymery, je chemická reakce oxidů hlinitokřemičitanů (obsahující ionty hliníku v tetraedrické koordinaci  $\text{Al}^{3+}$ ) s alkálií a alkalickými polykřemičitan. Způsobují to vazby v síti typu Si-O-Al.

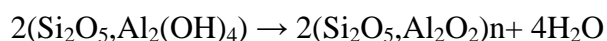
Ke zdůraznění tetraedrického uspořádání iontů hliníku se užívá zápis  $(\text{Si}_2\text{O}_5, \text{Al}_2\text{O}_2)_n$  u těchto specifických oxidů hlinitokřemičitanů, které jsou prekurzorem k procesu polymerace příslušných geopolymery [1, 2].



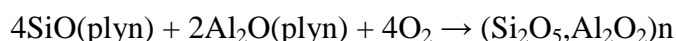
Obr. 3. Zobrazení molekulární struktury hlinitokřemičitanů užívaných jako prekurzor v procesu geopolymeryzace [1].

Výroba prekurzoru  $(\text{Si}_2\text{O}_5, \text{Al}_2\text{O}_2)_n$  se dělá:

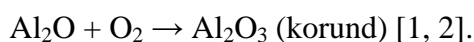
(a) vápnění hlinitokřemičitanových hydroxidů  $(\text{Si}_2\text{O}_5, \text{Al}_2(\text{OH})_4)$



(b) kondenzací par SiO a  $\text{Al}_2\text{O}$ :

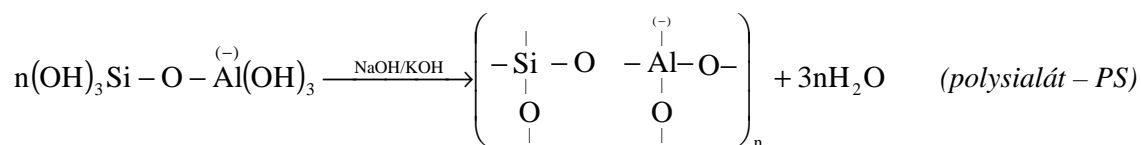
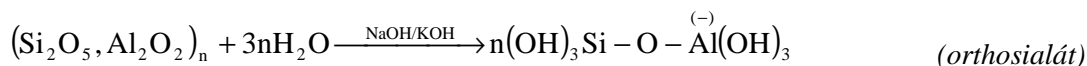


Současně při reakci vzniká:

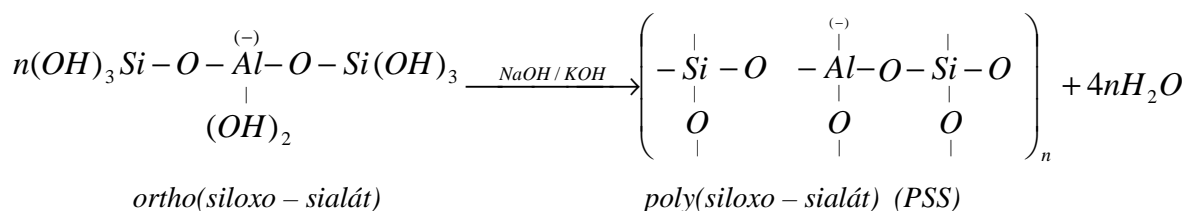
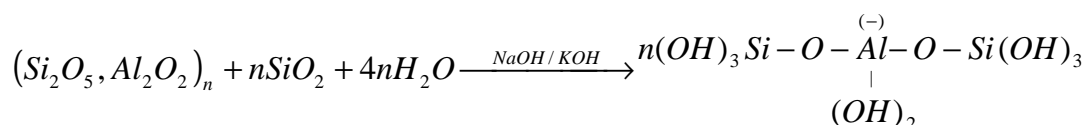


Geopolymery je proces exotermní a probíhá podle určitého vzoru. Ten lze považovat za výsledek polykondenzací hypotetických monomerů orthosialánových nebo ortho(siloxo-sialánových). Dnes se užívá nejvíce sodný polysialát ((Na)-PS), draselnatý polysialát ((K)-PS), sodnodraselnatý poly(siloxo-sialát) ((Na, K)-PSS) a také draselnatý poly(siloxo-sialát) ((K)-PSS) [1, 2].





Rov. 1. Chemické reakce probíhající během vzniku polysialátů [1, 2].



Rov. 2. Chemické reakce probíhající během vzniku poly(siloxo-sialátů) [1, 2].

## 2.2. Struktura geopolymerního materiálu

Fyzikálně-chemická struktura geopolymerního materiálu je velmi variabilní v závislosti na poměru hlavních sloučenin, původu surovin a podmínek syntézy. Výzkum je v této oblasti zatím v počáteční fázi [1].

Chemické složení je závislé na poměru atomů Si:Al v geopolymerním řetězci, obsahu a typu alkalického aktivátoru, vody a dalších přísad používaných při výrobě geopolymerních materiálů, má silný vliv na vlastnosti tohoto materiálu. Tyto faktory ovlivňují smrštění geopolymerního materiálu při syntéze, porositu, fyzikální a chemickou strukturu a také vlastnosti s nimi související, jako jsou vlastnosti tepelné, mechanické nebo tepelně-mechanické [1].

Anorganické polymerní materiály mohou být syntetizovány z různých hlinitokřemičitanů – např. přírodně se vyskytujícího metakaolinu nebo produktu průmyslové činnosti jakým je např. popílek. Každá surovina má vlastní charakteristické minerální a fyzikální složení. V závislosti na použití dané suroviny se budou lišit vlastnosti konečného produktu [1].

Další vliv je užití prekurzorů. Nejenom, že určuje chemické složení, ale i tvar a fázové složení částic. Má vliv na chemický a fyzikální průběh syntézy materiálu. Výsledkem je, že vyráběný materiál může mít podobné chemické složení, ale velmi odlišnou strukturu [1].

Do geopolymerní matrice jsou jako výztuž přidávány různé druhy částic. V našem případě se jedná o částice lupku, kamene, a různých druhů popílku.

## 2.3. Kompozity s geopolymerní maticí

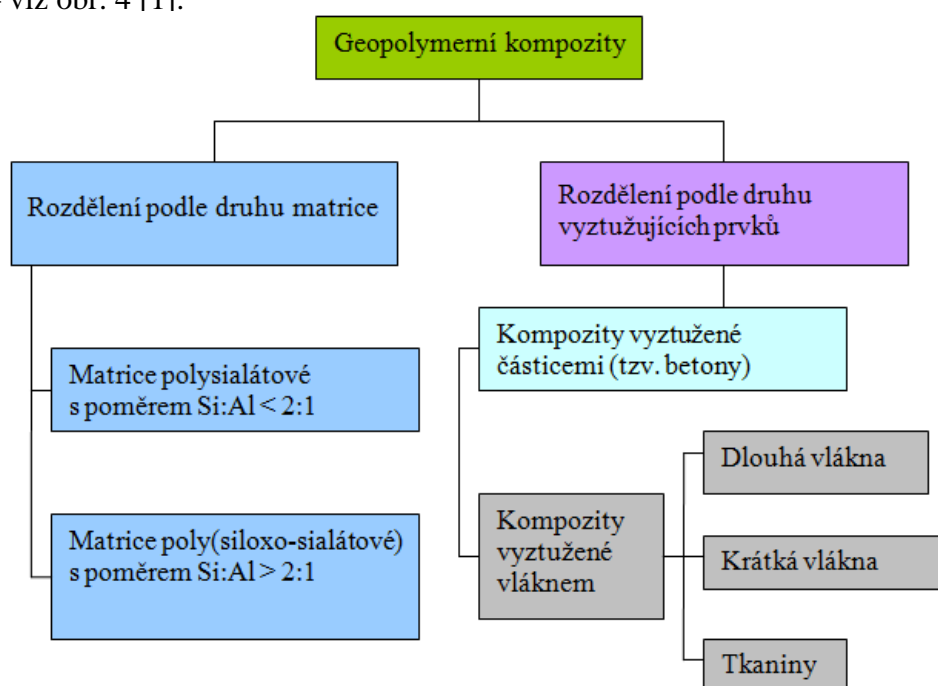
Volně v přírodě se vyskytující křemičitany (např. kaolin) podléhají transformaci při nízkých teplotách ve velmi krátké době do prostorové tří-dimenzionální struktury tekto-křemičitanů. Tepelné podmínky vytvrzování těchto materiálů jsou skoro shodné s podmínkami polykondenzace organických pryskyřic. Zároveň se řadí do oblasti tzv. geochemie. Tyto materiály se nazývají "geopolymery", tedy minerální polymery vzniklé procesem, který se nazývá geochemie nebo geosyntéza [1, 4].

Geosyntéza je založena na schopnosti hliníkových iontů (v koordinaci tetra nebo oktaedrické) způsobit krystalografické a chemické změny v síti křemičitanu, které umožňují jejich polymeraci [4].

V poslední době získaly geopolymerní materiály velkou popularitu díky malé hustotě, ceně, nízké teplotě výroby a ekologickým vlastnostem. Tyto vlastnosti se nemění ani za zvýšených teplot [1].

Geopolymery lze použít jako matrice kompozitních materiálů spolu s vhodně vybranými vyztužujícími prvky. Tím dochází ke zvýšení jejich mechanických vlastností, často i několikrát, aniž by došlo ke změně jejich vlastností při vyšších teplotách. Díky jejich nízké hustotě a poměrně snadné výrobě je jejich použití možné v mnoha moderních inženýrských aplikacích. Jednotlivé složky nemění svou identitu (tzn. vzájemně se úplně nerozpouštějí ani neslučují), ale na své okolí působí v součinnosti [1, 5].

Geopolymerní kompozity lze rozdělit podle geopolymerní matrice nebo typu vyztužujících prvků – viz obr. 4 [1].



Obr. 4. Přehled geopolymerních kompozitů [1].

Rozdíl mezi geopolymerními matricemi je dán poměrem Si:Al. Materiály mají odlišné vlastnosti, které jsou současně dány různorodostí použitých matric [1, 6].

## 2.4. Aplikace geopolymerního v průmyslu

Použití geopolymerních kompozitů se stále rozšiřuje do různých odvětví průmyslu. Do dnešní doby byl geopolymerní aplikován například v těchto odvětvích průmyslu:

- Stavitelství (tepelný izolátor)
- Letecký průmysl
- Jaderný průmysl
- Jako konstrukční materiál
- Ve slévárenství
- atd. [6].

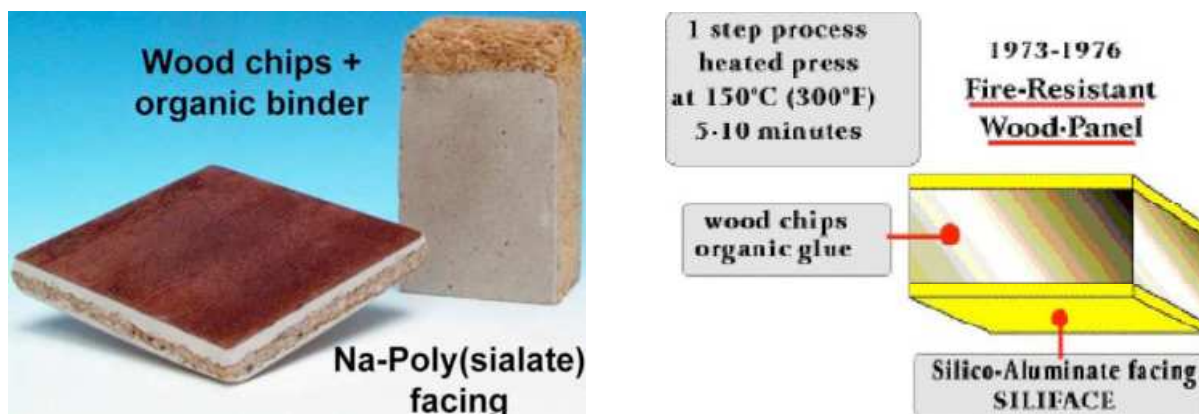
### Ohni odolné dřevo-geopolymerní panely (1973-1976):

První aplikace byly stavební výrobky. Byly to desky, které měly dřevotřískové jádro a povrch byl potažen geopolymerním. Tento kompozit byl vyroben jednodušším procesem, jeho charakteristickým znakem bylo simultánní vyztužení (zpevnění) dřevotřísky, jakož i anorganického geopolymerního, při stejných teplotních parametrech [1, 6].

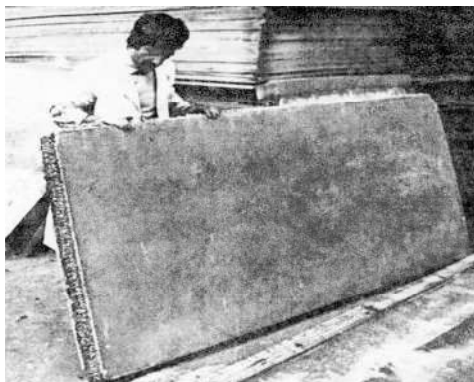
Výroba těchto panelů probíhala při parametrech:

- teplota: 130°C až 200°C
- použitý hydraulický tlak 1 až 3 MPa

Tyto panely se měly použít při stavbě středních a vysokých škol ve Francii, ale v roce 1976 byl projekt zrušen [1, 6].



Obr. 5. Ohni odolný dřevo-geopolymerní panel (struktura) [6].



*Obr. 6. Ohni odolný dřevo-geopolymerní panel [1, 6].*

### **Letecký průmysl:**

Od roku 1986 francouzská společnost Dassault Aviation aeronautic využila geopolymer jako materiálu na nástroje a formy při vývoji nových technologií, dále geopolymer používá při vývoji stíhacího letounu Rafale [1, 6].



*Obr. 7. Francouzské stíhací letadlo Rafale [1, 6].*

Pro firmu Northrop Aviation byly vyrobeny nástroje z geopolymerních kompozitů (kompozit uhlíková vlákna/SiC/geopolymer) používané při výrobě kompozitů určených pro nové tryskové bombardéry Amerických vzdušných sil [1, 6].

Dodnes byla vyrobena spousta nástrojů a mnoho jiných předmětů z geopolymerních kompozitů pro firmy z leteckého průmyslu, jako jsou: Airbus a SPF Aluminium processing [1, 6].



Obr. 8. Kompozit uhlíko-epoxidový (vlevo) hoří, zatímco kompozit uhlíkovo-geopolymerní (vpravo) stále udržuje teplotu 1200°C [1, 6].

### **Automobilový průmysl:**

Během sezóny Grand Prix 1994 a 1995, tým Benetton Formule 1 navrhl unikátní tepelný štít vyrobený z kompozitního geopolymery. Všechny části byly kolem oblasti výfuku nahrazeny tímto kompozitním geopolymery na místo titanu, ten odolal silným vibracím i vysokým teplotám přes 700°C [1, 6].

V roce 1999 byly geopolymerní kompozity také použity při konstrukci vozů americké závodní ligy C.A.R.T. (předtím tzv. Indy - Cart) na výfukový systém, který přecházel na carbon - geopolymerové kompozitní tělo [1, 6].



Obr. 9. Závodní vůz "The Eagle" jezdící v americké závodní lize C.A.R.T. v roce 1999 [1, 6].

### **Infrastruktura a aplikace ve stavebním průmyslu:**

Relativně nový a velmi atraktivní způsob aplikace geopolymery je na opravy nebo výztuže pro stavby z betonu, cihel a kamene. To se provádí obalením konstrukce dostatečným množstvím vláken, které se zajistí geopolymerní maticí. Takto lze vyztužit různé stavby např. mosty nebo opravit budovy poškozené zemětřesením nebo hurikánem. Pokud jde o prvky, které jsou uvnitř budov, je protipožární odolnost velmi žádanou vlastností. Kompozity z geopolymery se v této oblasti dobře prosazují [1, 6].

V Evropě by geopolymerní kompozity měly najít využití při rekonstrukci budov, které jsou cenným kulturním dědictvím. Zde je požární bezpečnost hlavní prioritou [1, 6].



Obr. 10. Betonový nosník s uloženou vrstvou geopolymerního kompozitu na povrchu před pevnostní zkouškou [1, 6].

### 3. Experimentální část

#### 3.1. Volba složení vzorků

Volil jsem vzorky s hmotnostním podílem částic plniva 40%, ty nám zajistí poměrně dobré mechanické vlastnosti s úsporou geopolymery. Při menším podílu částic se nám mechanické vlastnosti jen málo navýší. Počet druhů zvolených částic je celkem osm, ty nám poslouží jako plnivo do geopolymery.

Jako pojivo použijeme geopolymer s označením **LEPIDLO FC - 1** s poměrem **Si:Al  $\geq 10$** , které se uskládá v mrazícím zařízení, aby nedošlo k vytvrzení.



Obr. 11. Uskladnění geopolymery.

#### Druhy zvolených částic:

- Kámen (30%)
- Lupek (30%)
- Popílek K1 (30%)
- Popílek K3 (30%)
- Popílek K6 (30%)
- Popílek K6-LF (30%)
- Popílek OPE (20%)
- Popílek PRT (20%)

Závorka udává složení s nejlepšími mechanickými vlastnostmi [9], ale z důvodů úspory geopolymery jsem zvolil složení 40% u všech vybraných částic.



Druhy použitých popílků se liší velikostí částic a chemickým složením. To závisí na druhu spalovaného paliva. Do vzorků, ve kterých budou použity částice popílku, musíme přidat více vody, protože popílek je velice savý. Uvedené hodnoty jsou udávány jako hmotnostní %.

Podíl vody v závislosti na podílu popílku:

- $0 < 30\%$  popílku  $\Rightarrow$  přidat max. 5% vody
- $30 \leq 40\%$  popílku  $\Rightarrow$  přidat 5% až 10% vody
- $40 \leq 50\%$  popílku  $\Rightarrow$  přidat 15% až 20% vody
- $50 \leq 60\%$  popílku  $\Rightarrow$  přidat max. 25% vody

Podíl vody v závislosti na podílu kamene:

- $0 < 40\%$  kamene  $\Rightarrow$  nepřidává se voda
- $40 \leq 60\%$  kamene  $\Rightarrow$  přidat max. 5% vody

Podíl vody v závislosti na podílu lupku:

- $0 < 40\%$  lupku  $\Rightarrow$  nepřidává se voda
- $40 \leq 50\%$  lupku  $\Rightarrow$  přidat max. 5% vody
- $50 \leq 60\%$  lupku  $\Rightarrow$  přidat max. 10% vody



Obr. 12. Druhy použitých plniv.

### 3.1.1. Chemické složení vybraných plniv

Na přesné určení chemického složení popílků producenti užívají přesnější metody X-ray difrakce (např. WDX). Popílký musí splňovat normu obsahu jednotlivých prvků. Chemická složení popílků jsou známa od jejich producentů, v případě kamene a lupku byly analýzy provedeny v laboratořích TUL.

<b>Popílek K1:</b>												
Prvek	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	As	Zr	Mo
Atom[%]	50,18	1,35	0,47	21,03	23,83	0,20	0,32	0,90	0,75	0,15	0,34	0,49
Odchylka	0,48	0,27	0,05	0,46	0,27	0,05	0,08	0,06	0,04	0,00	0,04	0,05
<b>Popílek K3:</b>												
Prvek	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Fe	As
Atom[%]	53,84	0,35	0,10	9,74	30,57	0,82	0,12	0,93	2,11	0,76	0,57	0,10
Odchylka	1,69	0,16	0,07	2,39	2,60	0,22	0,02	0,21	1,11	0,31	0,23	0,03
<b>Popílek K6:</b>												
Prvek	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	As	-
Atom[%]	55,43	0,42	0,80	10,00	20,81	0,92	2,42	6,60	0,42	2,04	0,14	-
Odchylka	2,11	0,03	0,05	1,39	2,47	0,42	0,87	2,68	0,09	0,07	0,02	-
<b>Popílek K6-LF:</b>												
Prvek	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	As	-
Atom[%]	52,81	1,81	0,97	14,73	23,97	0,39	0,41	1,69	0,57	2,57	0,09	-
Odchylka	0,52	0,10	0,06	0,18	0,52	0,05	0,04	0,29	0,06	0,11	0,01	-
<b>Popílek OPE:</b>												
Prvek	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Cr	Fe	As	-
Atom[%]	52,65	0,47	0,43	12,64	28,54	1,27	0,97	0,41	0,08	2,44	0,11	-
Odchylka	1,49	0,09	0,08	1,57	0,73	0,03	0,26	0,06	0,01	0,25	0,02	-
<b>Popílek PRT:</b>												
Prvek	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	As	-	-
Atom[%]	55,06	0,77	1,17	10,89	25,17	1,70	0,93	0,53	3,68	0,10	-	-
Odchylka	0,22	0,03	0,09	0,44	0,71	0,09	0,11	0,13	0,20	0,00	-	-
<b>Kámen:</b>												
Prvek	O	Na	Al	Si	K	Ca	Mn	Fe	-	-	-	-
Atom[%]	70,48	1,68	12,21	11,31	3,31	0,37	0,11	0,53	-	-	-	-
<b>Lupek:</b>												
Prvek	O	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	-	-	-	-
Atom[%]	69,03	15,82	12,89	0,23	0,71	0,20	0,24	0,86	-	-	-	-

Tab. 3.1.1. Chemické složení vybraných částic plniva.

### 3.2. Druhy použitých forem a jejich užití

#### Druhy forem:

1. Malá válcová forma:

Má rozměry Ø12,5 x 28,5 mm, vzorky z této formy slouží na elektronovou mikroskopii SEM a EDX.



Obr. 13. Malá válcová forma.



2. Středně velká válcová forma:

Má rozměry  $\varnothing 30 \times 24,5$  mm, vzorky z této formy slouží k pozorování odlitého povrchu po dobu zrání vzorku z geopolymerního kompozitu pod optickým mikroskopem. K dispozici byla ještě druhá forma s podobnými rozměry  $\varnothing 31 \times 51$  mm.



*Obr. 14. Středně velká válcová forma:  $\varnothing 31 \times 51$  mm (vlevo) a  $\varnothing 30 \times 24,5$  mm (vpravo).*

3. Velká kvádřová forma:

Její rozměry jsou  $50 \times 50 \times 110$  mm, obsahuje 4 formy vedle sebe, je vyrobena z plexiskla slepeného chemoprenem. Vzorky odlité z této formy sloužily k měření tvrdosti, hustoty a k měření rozměrového smrštění. Měření probíhala 4x během zrání vzorku. Po dozrání byl vzorek obroben patřičnou technologií. Následně byly vzorky rozřezány na menší kusy a ty dány do různých prostředí. Na těchto vzorcích jsem sledoval degradaci povrchu geopolymerního kompozitu.



*Obr. 15. Velká kvádřová forma.*

### 3.3. Technologie výroby vzorků

Výroba geopolymerního kompozitu probíhala podle následujícího postupu. Platí pro všechny vybrané druhy geopolymerního kompozitu.

Možnost použití vzorku pro další účely je celkem za 28 dní. Po tuto celou dobu probíhá vytvrzování, zrání a jeho měření.

#### 1. Příprava geopolymerní hmoty:

Zvolíme si celkovou hmotnost geopolymerního kompozitu. Volíme s ohledem na velikost formy, do které bude vzorek odléván. Rozpočítáme hmotnosti jednotlivých složek dle procentuálního složení (hmotnost geopolymerního kompozitu a plniva). Pokud musíme přidat vodu, tak hmotnost vody počítáme z celkové hmotnosti geopolymerního kompozitu (v něm hmotnost vody není započítána) dle procentuálního podílu.

Vezmeme si dostatečně velkou a čistou nádobu. Dáme ji na váhu a váhu následně vynulujeme. Nyní do nádoby dáme vypočtené množství plniva. Váhu znovu vynulujeme a přidáme vypočtené množství geopolymerního kompozitu. Pak vše důkladně promícháme. Mícháme 5 až 15 minut, dokud dané složky nebudou důkladně promíchány (zhomogenizovány). Když budeme přidávat vodu do vzorku, váhu vynulujeme a přidáme poloviční množství vody a promícháme. Po částečném promíchání dáme nádobku s hmotou na váhu a zase vynulujeme a přidáme zbytek množství vody. Pak důkladně hmotu promícháme.

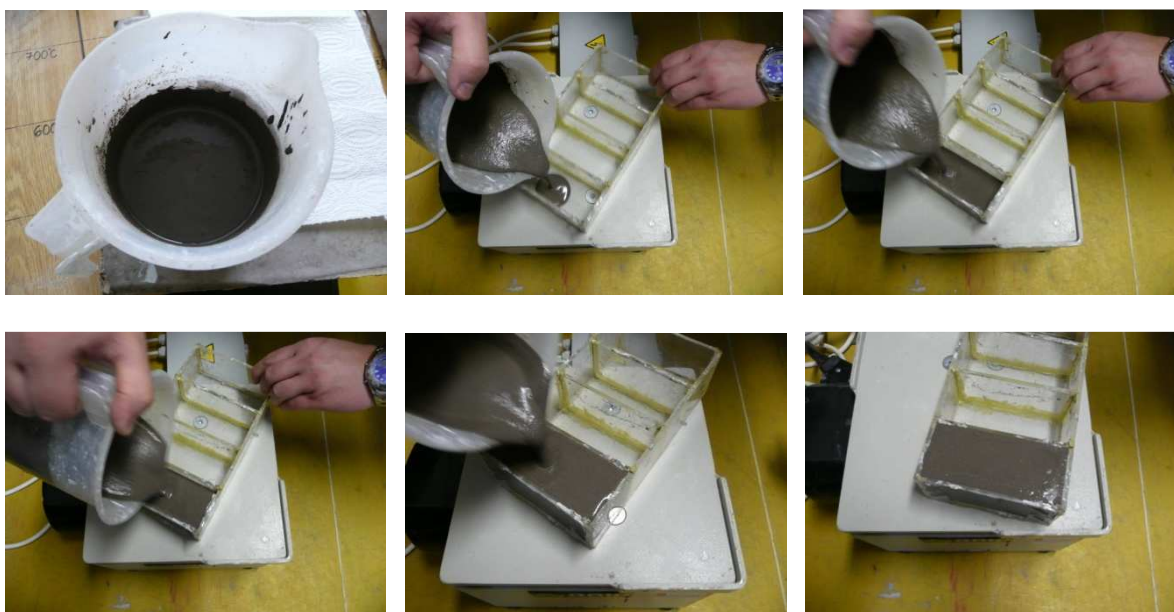




*Obr. 16. Postup míchání geopolymerní hmoty.*

## **2. Odlití vzorku z geopolymerní hmoty:**

Takto připravenou hmotu budeme pomalu vlévat do formy, která je umístěna na vibračním zařízení. Vibrace zajistí rozprostření hmoty po celé ploše formy a následně odstraní vzduchové bubliny vzniklé nalitím geopolymerní hmoty do formy. Tyto bubliny se snažíme co nejvíce odstranit.



*Obr. 17. Postup odlití geopolymerní hmoty do formy.*



*Obr. 18. Vibrační zařízení.*



### **3. Vytvrzování vzorku geopolymerního kompozitu:**

Po odlití a dostatečném odplynění na vibračním zařízení necháme vzorek vytvrzovat. Během procesu vytvrzování se vzorek smršťuje, mění hustotu a mechanické vlastnosti. K vytvrzování jsem používal 2 způsoby. Ty byly použity pro všechny velikosti forem.

#### Vytvrzované v peci při 60°C po 24 hodin:

Namíchaný vzorek ve formě vložíme do pece na 24 hodin při teplotě 60°C. Poté vzorek s formou vyndáme a necháme ho ležet při laboratorní teplotě minimálně ještě 5 dní, než ho vyjmeme z formy. Při tomto způsobu vytvrzování získáme podstatně (asi až 1,5x ) vyšší mechanické hodnoty než při vytvrzování při laboratorní teplotě.



*Obr. 19. Pec na vytvrzování geopolymerní hmoty.*

#### Vytvrzované při laboratorní teplotě po 6 - 7 dní:

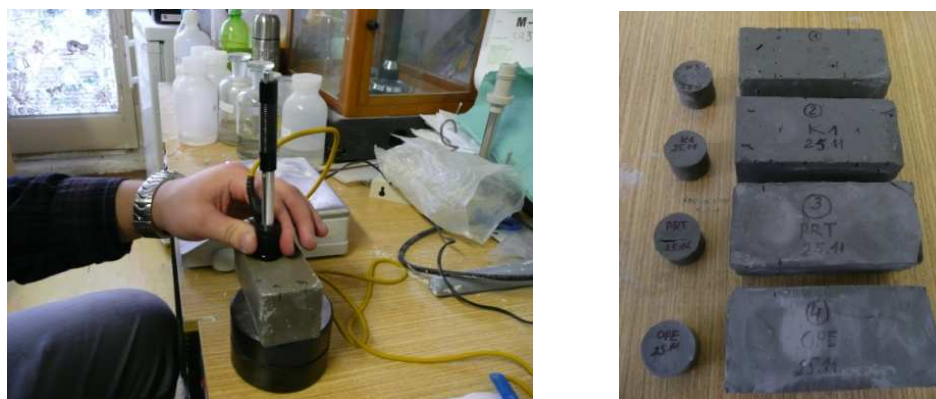
Připravenou geopolymerní hmotu odlijeme do připravené formy a necháme ji vytvrdit 6 až 7 dní v laboratorní teplotě přibližně 20°C, pak následuje vyjmutí z formy. Tento způsob vytvrzování byl použit u většiny vzorků. Jeho nevýhodou je, že po této době vytvrzování, geopolymerní kompozit nedosahuje tak vysokých mechanických hodnot jako při vytvrzování v peci při 60°C. Naopak pozitivní je mnohem nižší energetická náročnost.

### **4. Vyjmutí vzorku z formy:**

Po uplynutí vytvrzovací doby (vždy 6 až 7 dnů) vyjmeme vzorek z formy, popřípadě odbrousíme nerovnosti a vyznačíme místa, kde budeme měřit rozměry. Na takto připraveném vzorku provedeme 1. měření. Dále změříme vnitřní rozměry formy pro daný vzorek. Poté necháme vzorek zrát mimo formu.

### **5. Zrání vzorku a průběh měření veličin geopolymerního kompozitu:**

Uvnitř vzorku během doby zrání probíhají změny. Jedná se o stejné změny jako při vytvrzování (smrštění, změna hustoty a mechanických vlastností). Zrání probíhá další 3 - 4 týdny po vyjmutí z formy. Každý týden na vzorku probíhá měření rozměrů, tvrdosti a hmotnosti. Z těchto údajů se pak dopočítává smrštění a hustota geopolymerního kompozitu.



*Obr. 20. Zrání a měření geopolymerního kompozitu.*

#### **6. Obrobení vzorků:**

Po dozrání jsou boční plochy vzorků obrobeny různými technologiemi a to frézováním a broušením. Spodní strana zůstane odlitá, tedy neobrobená. S vrchní plochou se nic nedělá (zůstane na popisek vzorků).

Obrábění proběhlo na TUL - Katedra obrábění a montáže.

#### **7. Rozřezání vzorků:**

Obrobené vzorky geopolymerního kompozitu je nutno rozřezat na 3 menší vzorečky, které budou vystaveny odlišným degradačním prostředí. Na takto připravených vzorcích se bude pozorovat změna povrchu, měřit jejich tvrdost a hmotnost.

K řezání vzorků jsem užíval flexi DELTA ABRASIMET CUTTER.



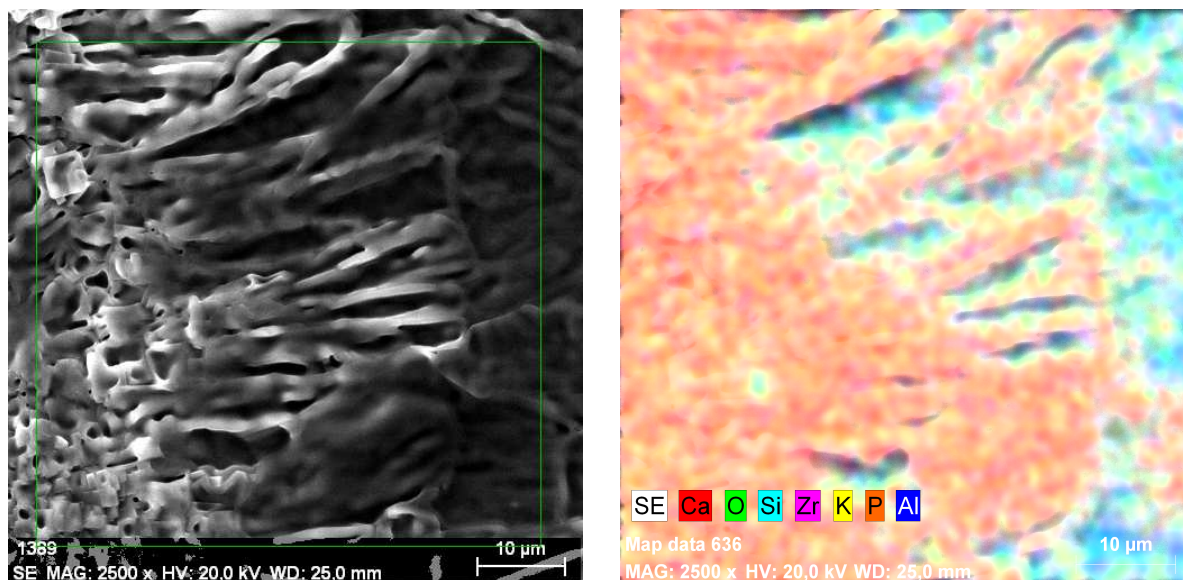
*Obr. 21. Elektrická flexa DELTA ABRASIMET CUTTER.*

### 3.4. Složení vybraných geopolymerních vzorků s různými typy plniv

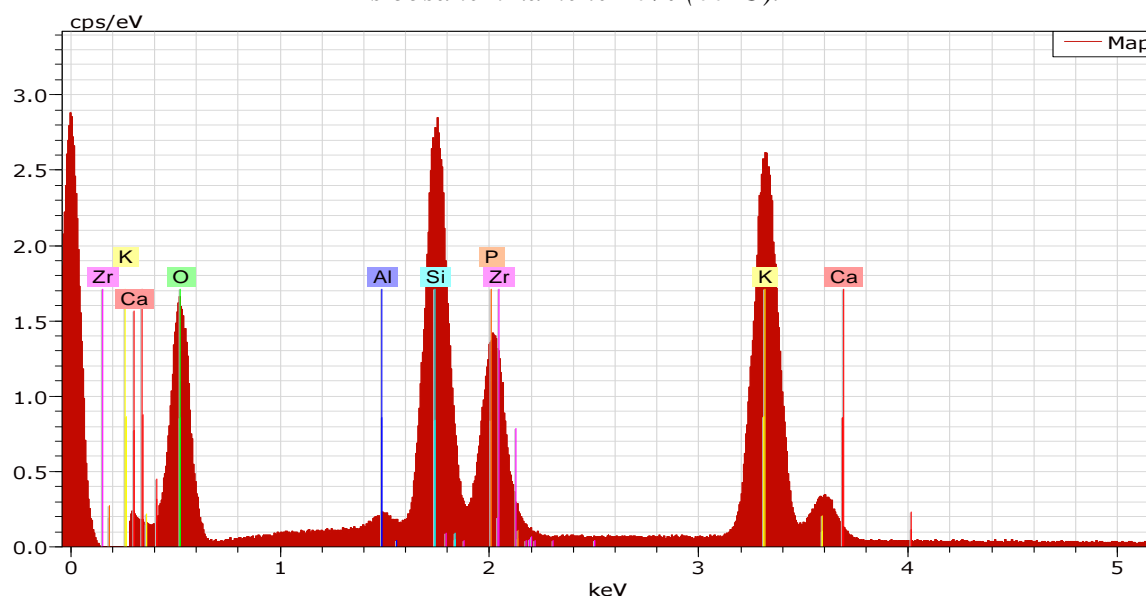
#### 3.4.1. Vzorky vytvrzované při 60°C po 24 hodin

##### 1. Kámen 40% - vytvrzovaný při 60°C po 24 hodin

- odlitý, vytvrzovaný při 60°C po 24 hodin
- forma velká: 280g kamene + 420g geopolymery
- vyroben 20. 10. 2010, nechán 6 dní ležet, pak bylo prováděno měření



Obr. 22. SEM a EDX pohled na povrch geopolymerního kompozitu s obsahem kamene 40% (60°C).



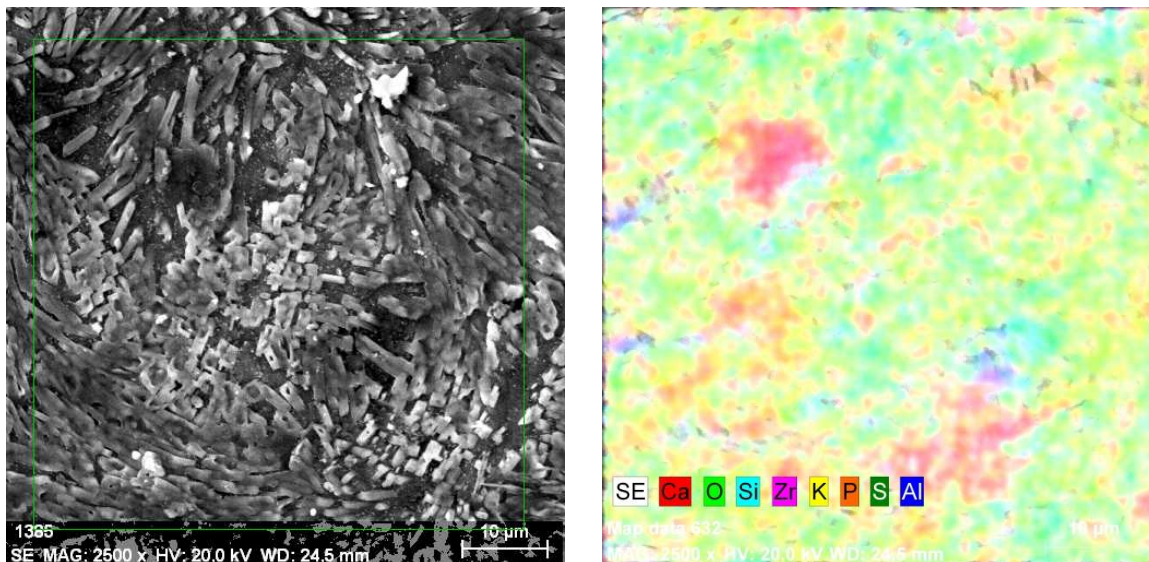
Graf. 1. Energetické spektrum EDX prvků geopolymerního kompozitu s obsahem kamene 40% (60°C).

Kámen 40% - vytvrzovaný při 60°C po 24 hodin:							
Prvek	O	Al	Si	P	K	Ca	Zr
Atom [%]	68,91	0,47	10,02	5,83	14,01	0,19	0,56

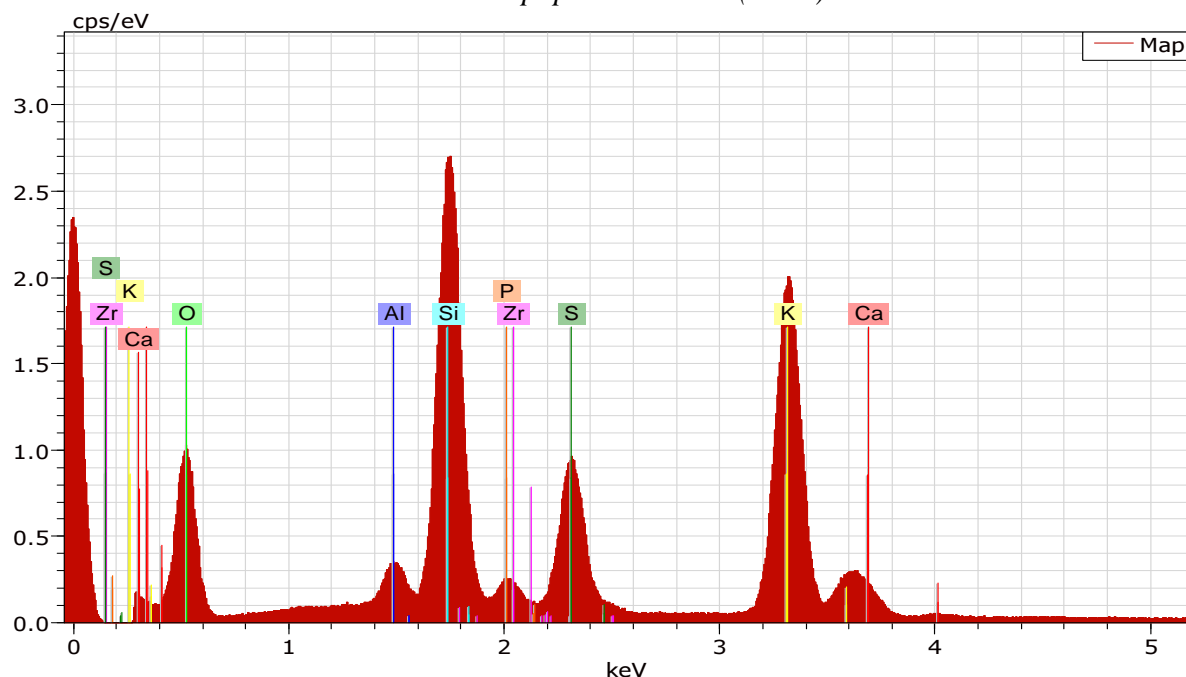
Tab. 3.4.1. Hmotnostní podíly jednotlivých prvků v geopolymerním kompozitu s obsahem kamene 40% (60°C).

## 2. Popílek K6 40% - vytvrzovaný při 60°C po 24 hodin

- odlitý, vytvrzovaný při 60°C po 24 hodin
- forma velká: 280g popílku + 420g geopolymery + 10% vody (při 1. míchání 5% = 35g a po chvíli zbytek 5% = 35g)
- vyroben 20. 10. 2010, nechán 6 dní ležet, pak bylo prováděno měření



Obr. 23. SEM a EDX pohled na povrch geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K6 40% (60°C).



Graf. 2. Energetické spektrum EDX prvků geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K6 40% (60°C).

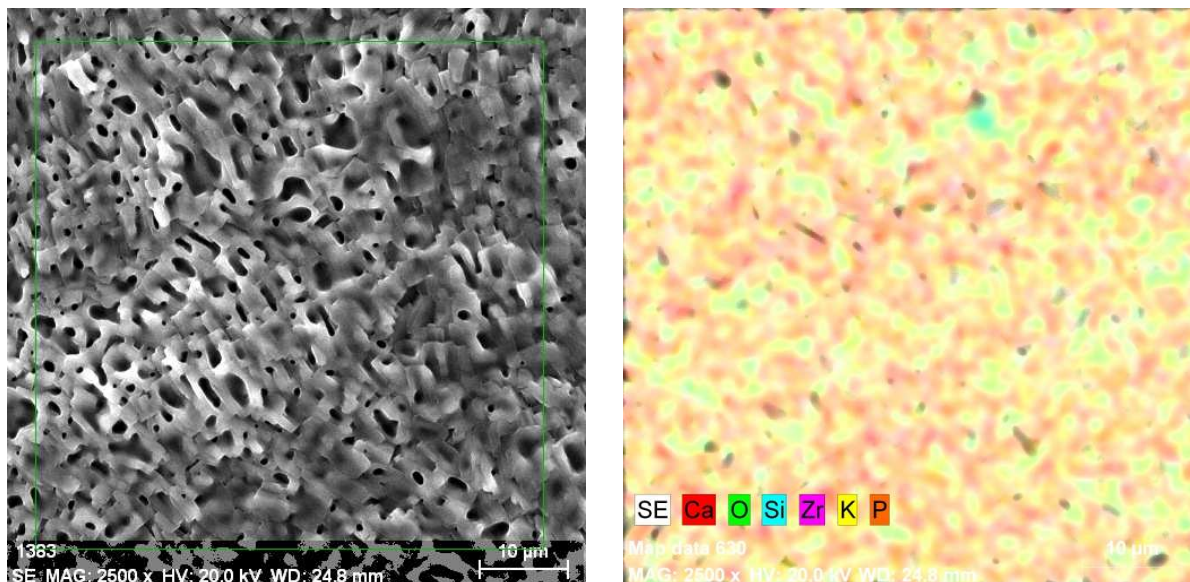
Popílek K6 40% - vytvrzovaný při 60°C po 24 hodin							
Prvek	O	Al	Si	P	K	Ca	Zr
Atom [%]	61,05	1,98	14,32	0,88	14,05	1,29	0,36

Tab. 3.4.2. Hmotnostní podíly jednotlivých prvků v geopolymerním kompozitu s obsahem popílku K6 40% (60°C).

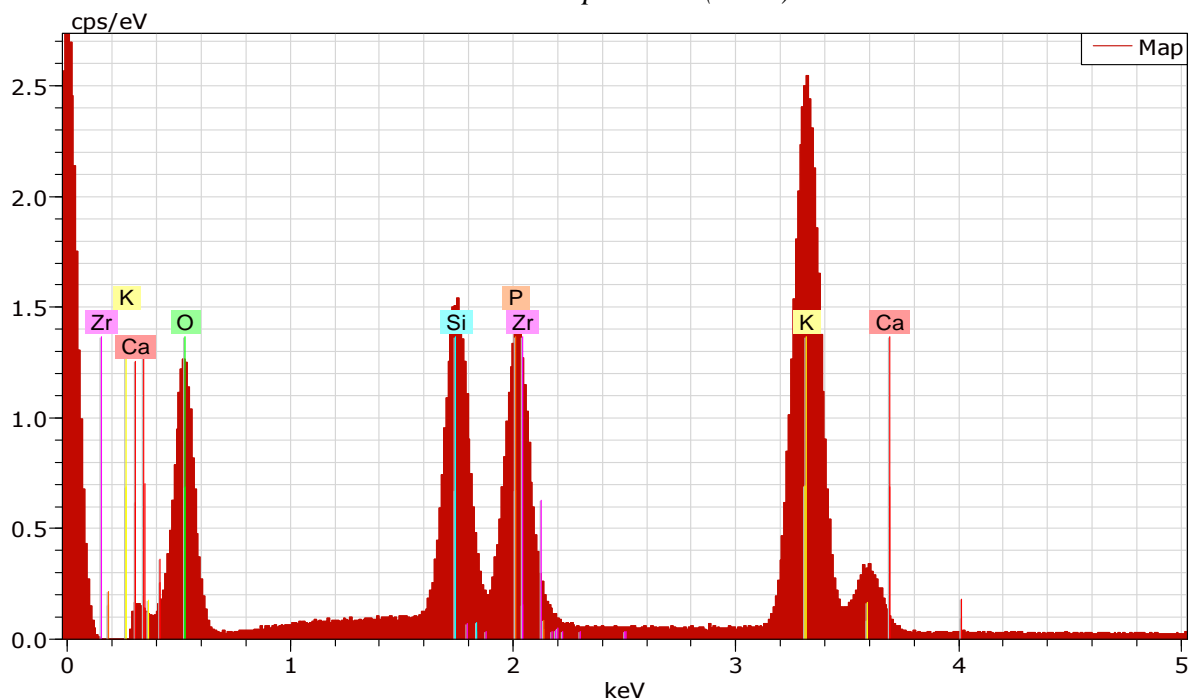


### 3. Lupek 40% - vytvrzovaný při 60°C po 24 hodin

- odlitý, vytvrzovaný při 60°C po 24 hodin
- forma velká: 280g lupku + 420g geopolymery
- vyroben 22. 10. 2010, nechán 4 dny ležet, pak bylo prováděno měření



Obr. 24. SEM a EDX pohled na povrch geopolymerního kompozitu s obsahem lupku 40% (60°C).



Graf. 3. Energetické spektrum EDX prvků geopolymerního kompozitu s obsahem lupku 40% (60°C).

Lupek 40% - vytvrzovaný při 60°C po 24 hodin						
Prvek	O	Si	P	K	Ca	Zr
Atom [%]	67,96	6,80	7,40	17,13	0,15	0,55

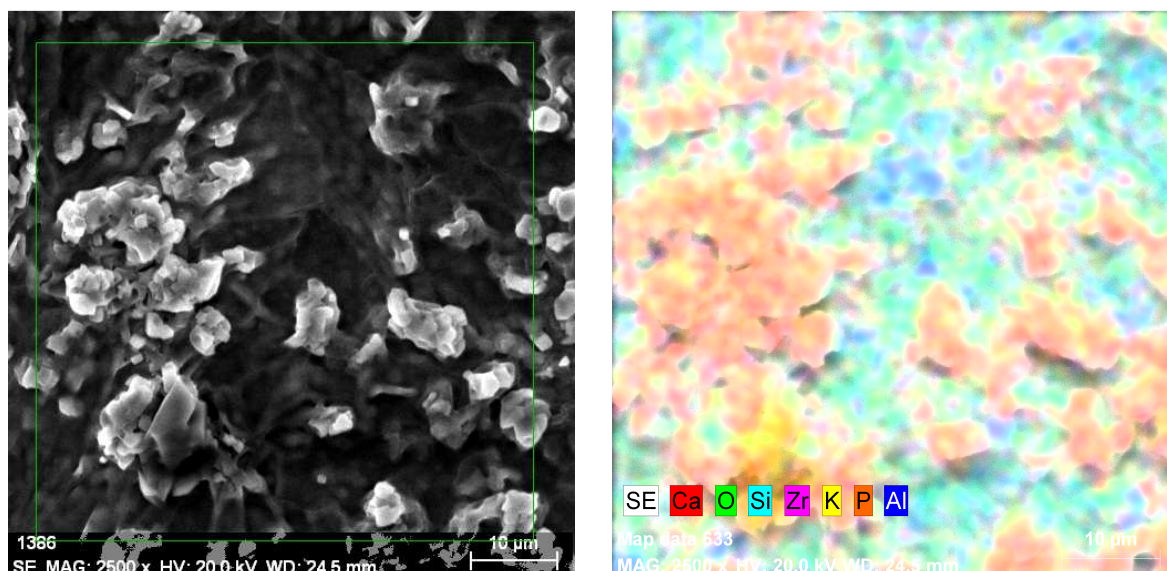
Tab. 3.4.3. Hmotnostní podíly jednotlivých prvků v geopolymerním kompozitu s obsahem lupku 40% (60°C).



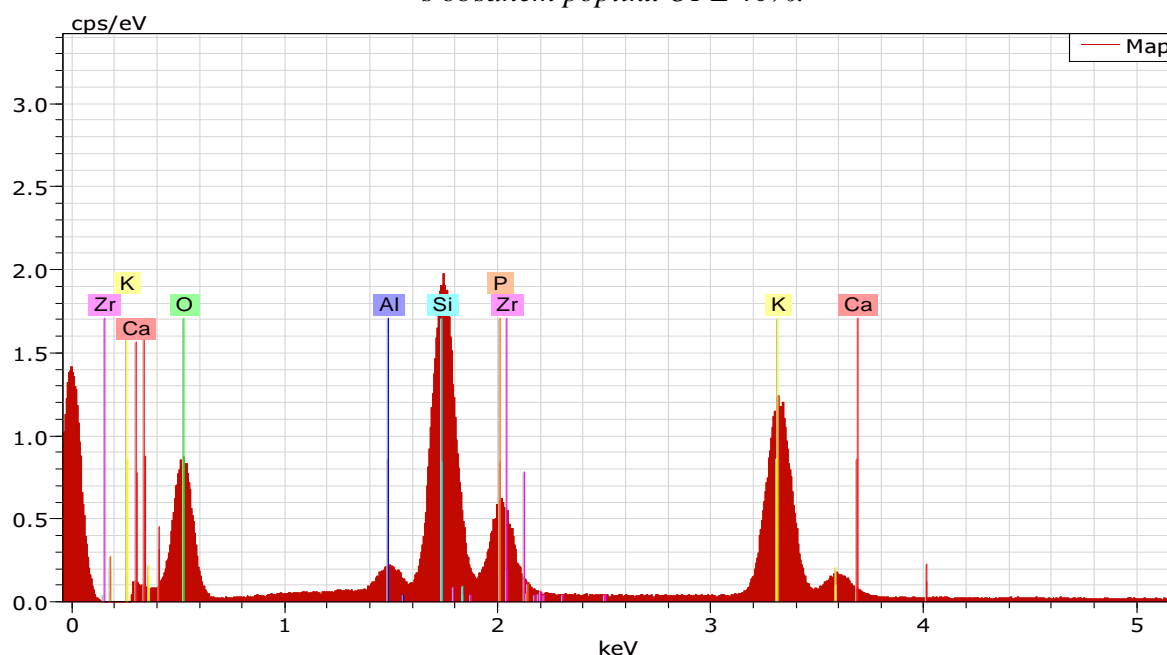
### 3.4.2. Vzorky vytvrzované při laboratorní teplotě 20°C po 6 až 7 dní

#### 1. Popílek OPE 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 - 7 dní

- odlitý, vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C
- forma velká: 220g popílku OPE + 330g geopolymery + 5% vody (5% = 25g)
- vyroben 8. 12. 2010, nechán 6 dní ležet, pak bylo prováděno měření



Obr. 25. SEM a EDX pohled na povrch geopolymerního kompozitu s obsahem popílku OPE 40%.



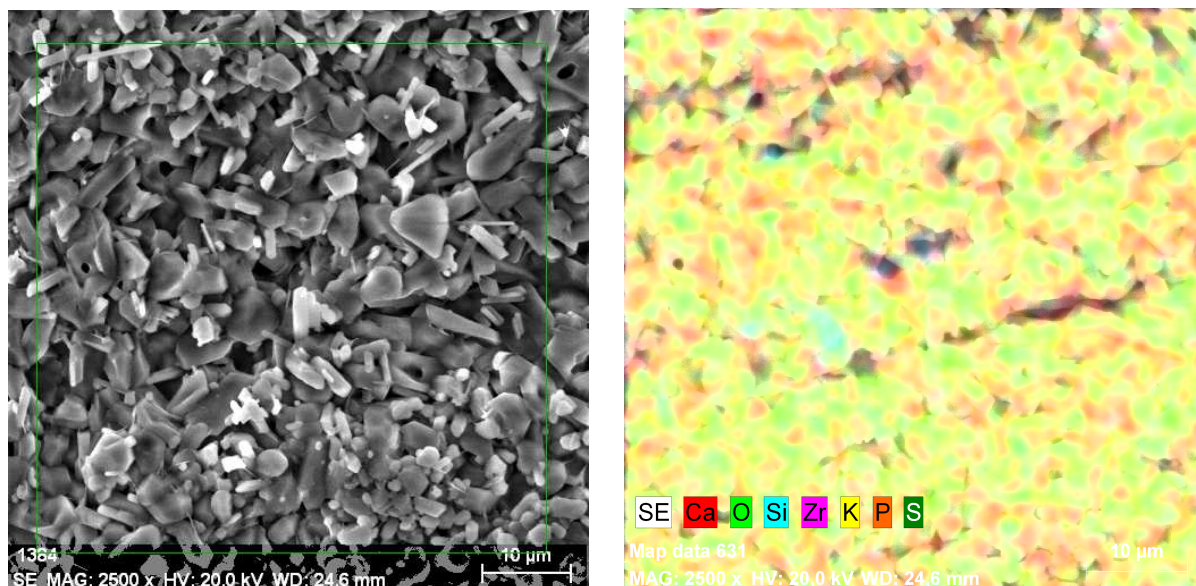
Graf. 4. Energetické spektrum EDX prvků geopolymerního kompozitu s obsahem popílku OPE 40%.

Popílek OPE 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 - 7 dní							
Prvek	O	Al	Si	P	K	Ca	Zr
Atom [%]	67,83	1,36	13,38	4,49	12,02	0,33	0,60

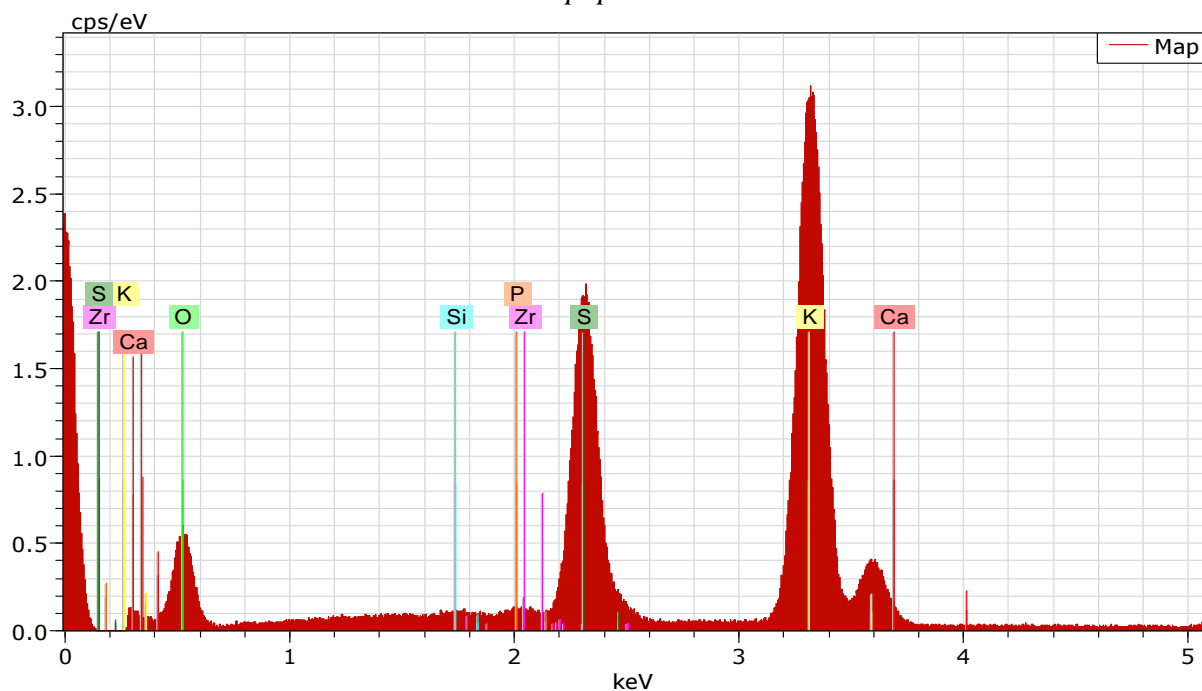
Tab. 3.4.4. Hmotnostní podíly jednotlivých prvků v geopolymerním kompozitu s obsahem popílku OPE 40%.

## 2. Popílek PRT 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 - 7 dní

- odlitý, vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C
- forma velká: 220g popílku PRT + 330g geopolymery + 5% vody (5% = 25g)
- vyroben 8. 12. 2010, nechán 6 dní ležet, pak bylo prováděno měření



Obr. 26. SEM a EDX pohled na povrch geopolymerního kompozitu s obsahem popílku PRT 40%.



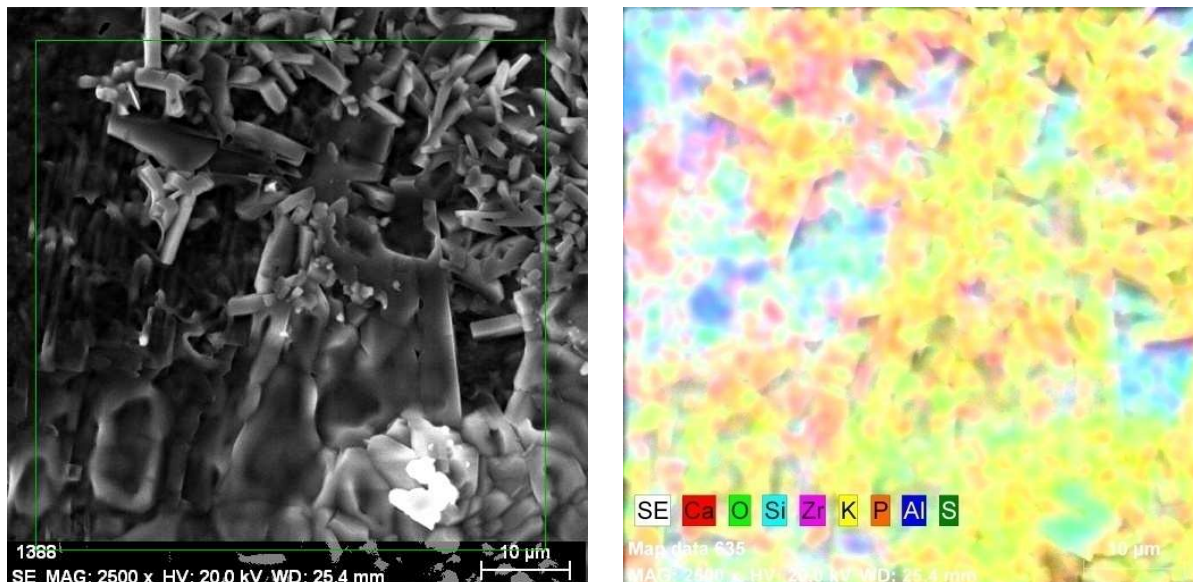
Graf. 5. Energetické spektrum EDX prvků geopolymerního kompozitu s obsahem popílku PRT 40%.

Popílek PRT 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 - 7 dní							
Prvek	O	Si	P	S	K	Ca	Zr
Atom [%]	54,53	0,28	0,19	14,57	29,81	0,41	0,20

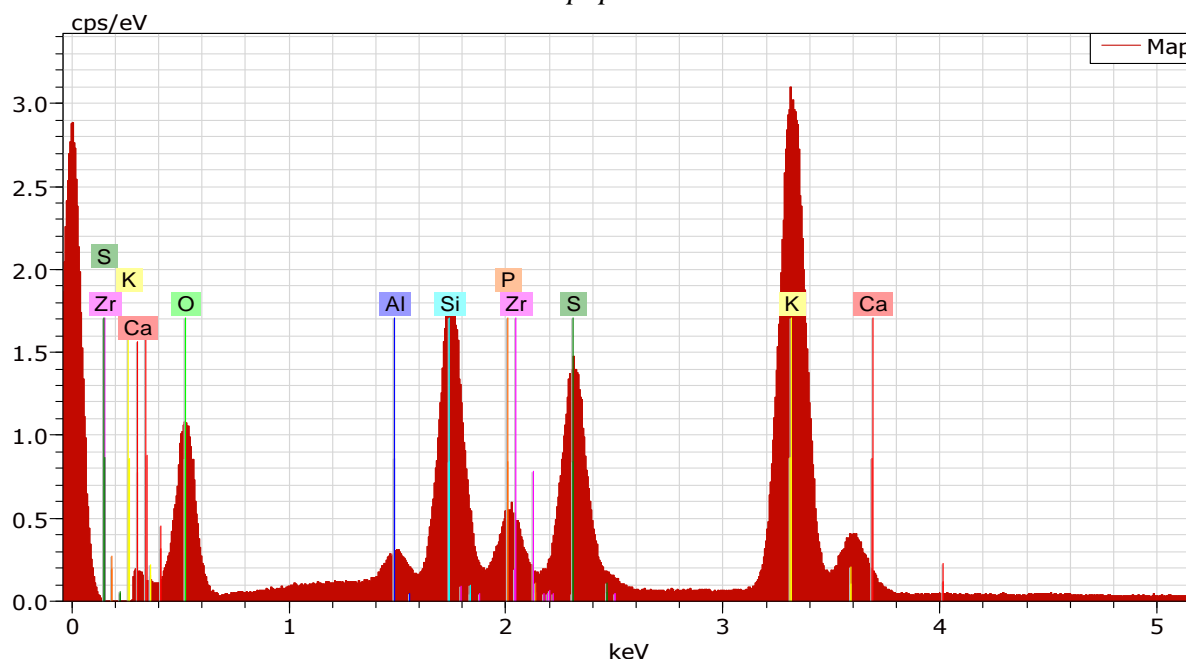
Tab. 3.4.5. Hmotnostní podíly jednotlivých prvků v geopolymerním kompozitu s obsahem popílku PRT 40%.

### 3. Popílek K1 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 – 7 dní

- odlitý, vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C
- forma velká: 220g popílku K1 + 330g geopolymery + 10% vody (při 1. míchání 5% = 25g a po chvíli zbytek 5% = 25g)
- vyroben 8. 12. 2010, nechán 6 dní ležet, pak bylo prováděno měření



Obr. 27. SEM a EDX pohled na povrch geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K1 40%.



Graf. 6. Energetické spektrum EDX prvků geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K1 40%.

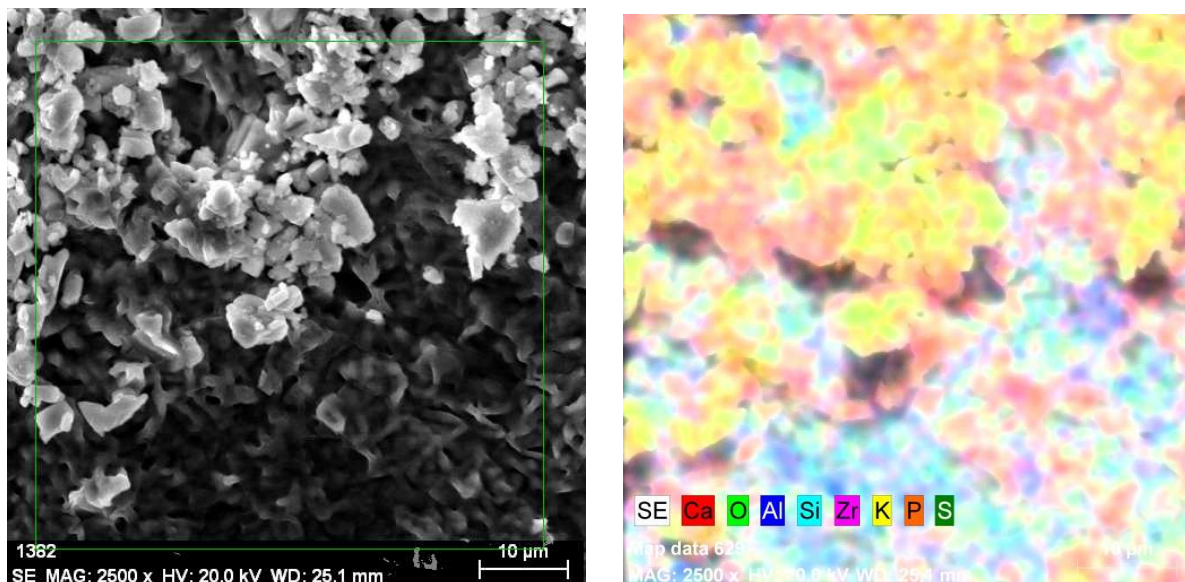
Popílek K1 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 - 7 dní								
Prvek	O	Al	Si	P	S	K	Ca	Zr
Atom [%]	60,26	1,39	8,47	2,18	7,83	19,03	0,35	0,49

Tab. 3.4.6. Hmotnostní podíly jednotlivých prvků v geopolymerním kompozitu s obsahem popílku K1 40%.

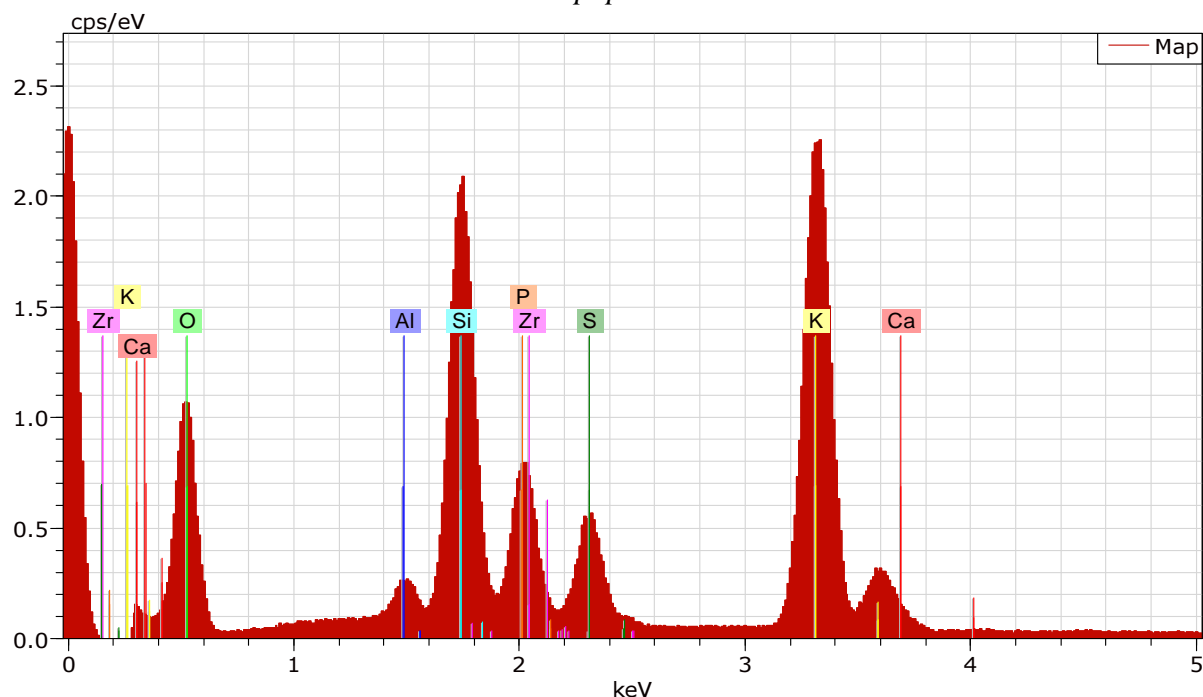


#### 4. Popílek K3 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 – 7 dní

- odlitý, vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C
- forma velká: 220g popílku K3 + 330g geopolymery + 5% vody (5 % = 25g)
- vyroben 8. 12. 2010, nechán 6 dní ležet, pak bylo prováděno měření



Obr. 28. SEM a EDX pohled na povrch geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K3 40%.



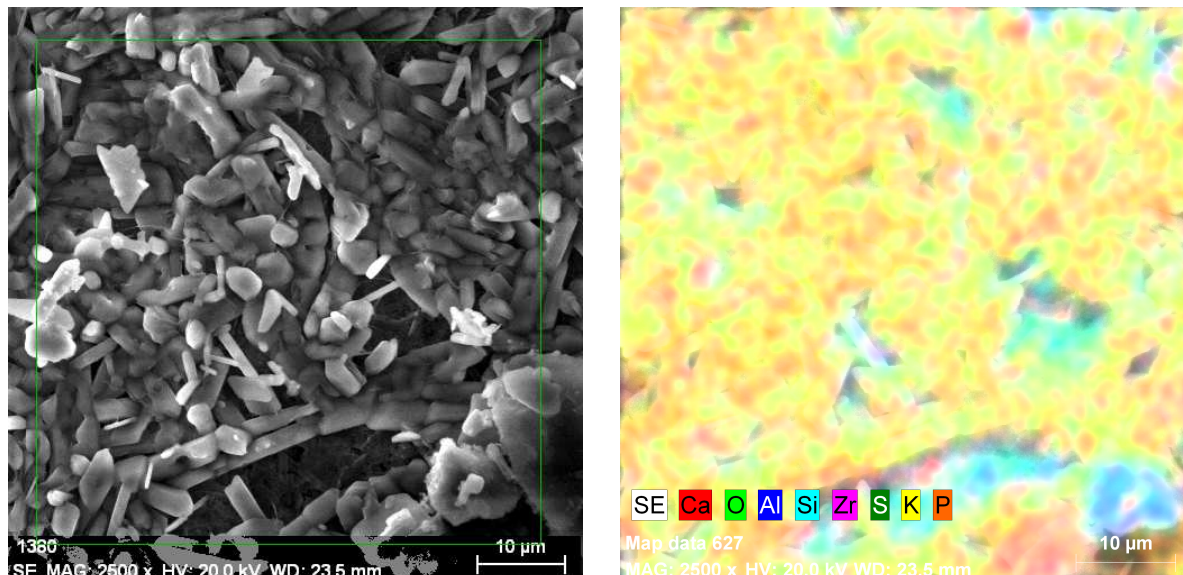
Graf. 7. Energetické spektrum EDX prvků geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K3 40%.

Popílek K3 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 – 7 dní								
Prvek	O	Al	Si	P	S	K	Ca	Zr
Atom [%]	65,96	0,98	9,58	4,00	3,23	15,30	0,57	0,37

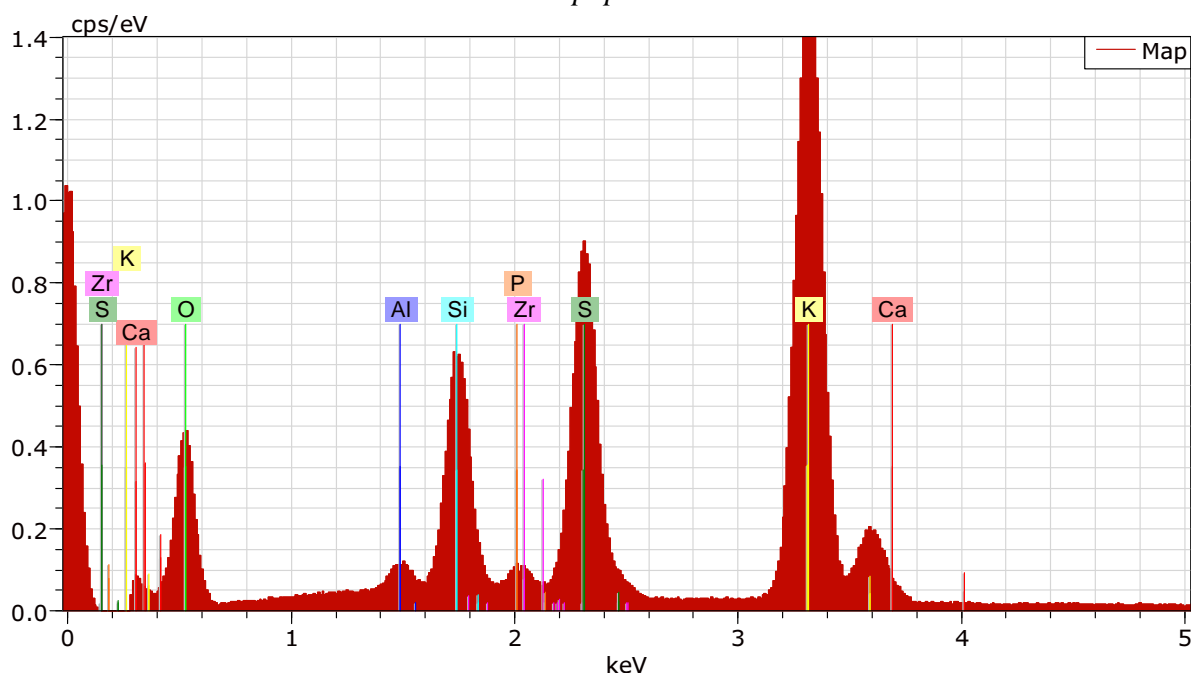
Tab. 3.4.7. Hmotnostní podíly jednotlivých prvků v geopolymerním kompozitu s obsahem popílku K3 40%.

### 5. Popílek K6 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 – 7 dní

- odlitý, vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C
- forma velká: 280g popílku K6 + 420g geopolymery + 10% vody (při 1. míchání 5% = 35g a po chvíli zbytek 5% = 35g)
- vyroben 15. 12. 2010, nechán 6 dní ležet, pak bylo prováděno měření



Obr. 29. SEM a EDX pohled na povrch geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K6 40%.



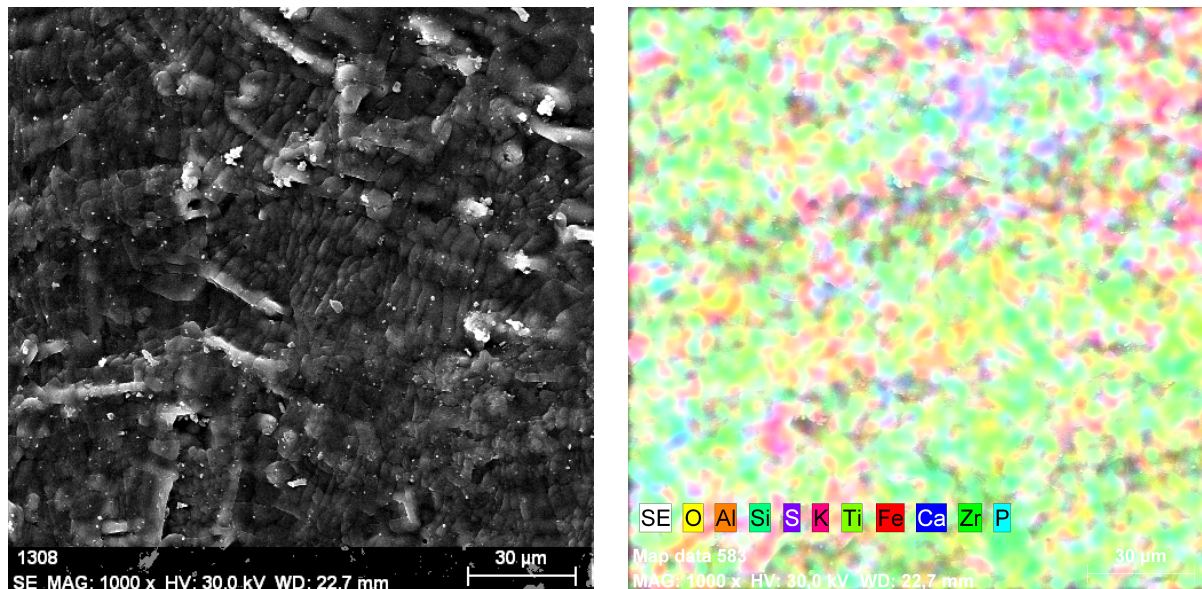
Graf. 8. Energetické spektrum EDX prvků geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K6 40%.

Popílek K6 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 - 7 dní								
Prvek	O	Al	Si	P	S	K	Ca	Zr
Atom [%]	59,24	0,85	5,96	0,49	10,59	22,13	0,43	0,30

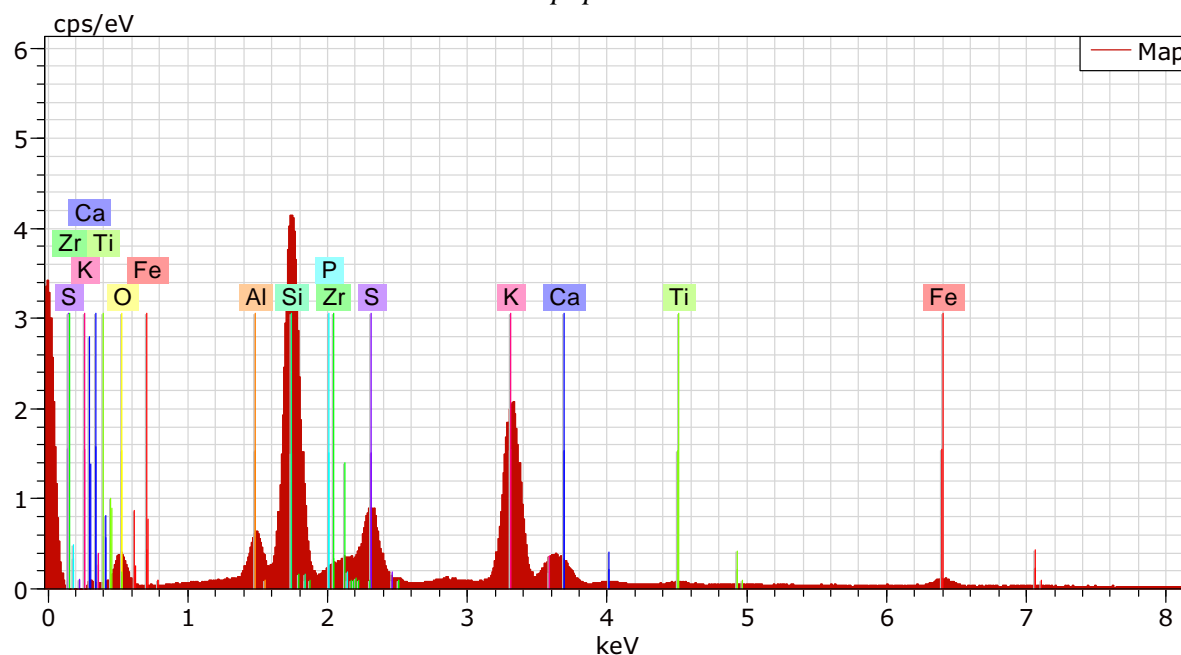
Tab. 3.4.8. Hmotnostní podíly jednotlivých prvků v geopolymerním kompozitu s obsahem popílku K6 40%.

## 6. Popílek K6 - LF 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 – 7 dní

- odlitý, vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C
- forma velká: 280g popílku K6-LF + 420g geopolymery + 10% vody (při 1. míchání 5% = 35g a po chvíli zbytek 5% = 35g)
- vyroben 15. 12. 2010, nechán 6 dní ležet, pak bylo prováděno měření



Obr. 30. SEM a EDX pohled na povrch geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K6-LF 40%.



Graf. 9. Energetické spektrum EDX prvků geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K6-LF 40%.

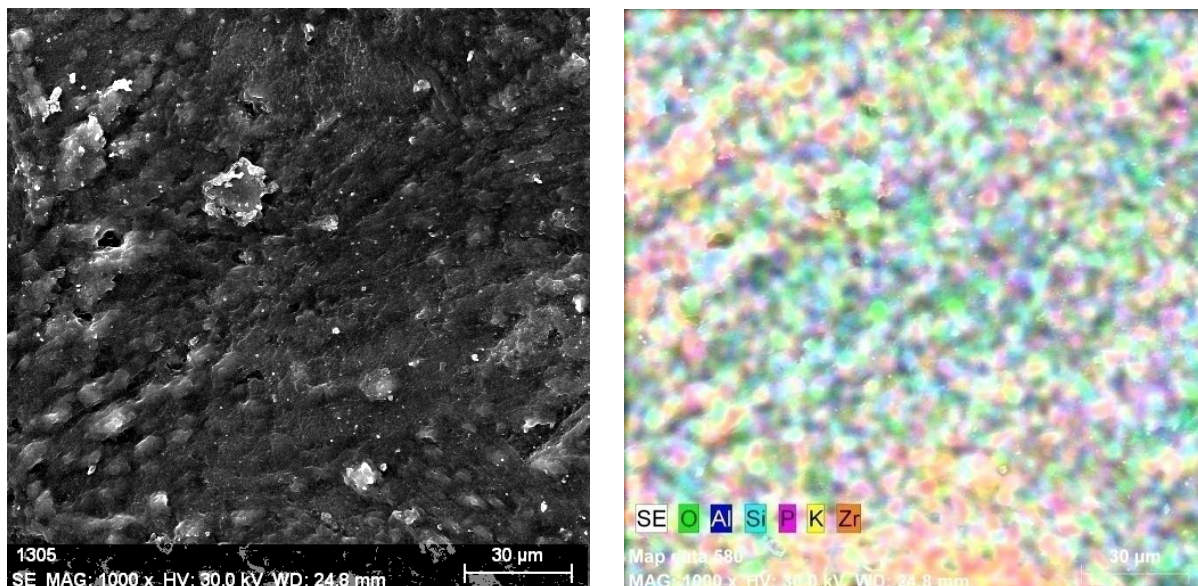
Popílek K6 – LF 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 - 7 dní										
Prvek	O	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Fe	Zr
Atom [%]	57,43	3,02	21,71	0,10	5,07	10,23	1,34	0,16	0,59	0,36

Tab. 3.4.9. Hmotnostní podíly jednotlivých prvků v geopolymerním kompozitu s obsahem popílku K6-LF 40%.

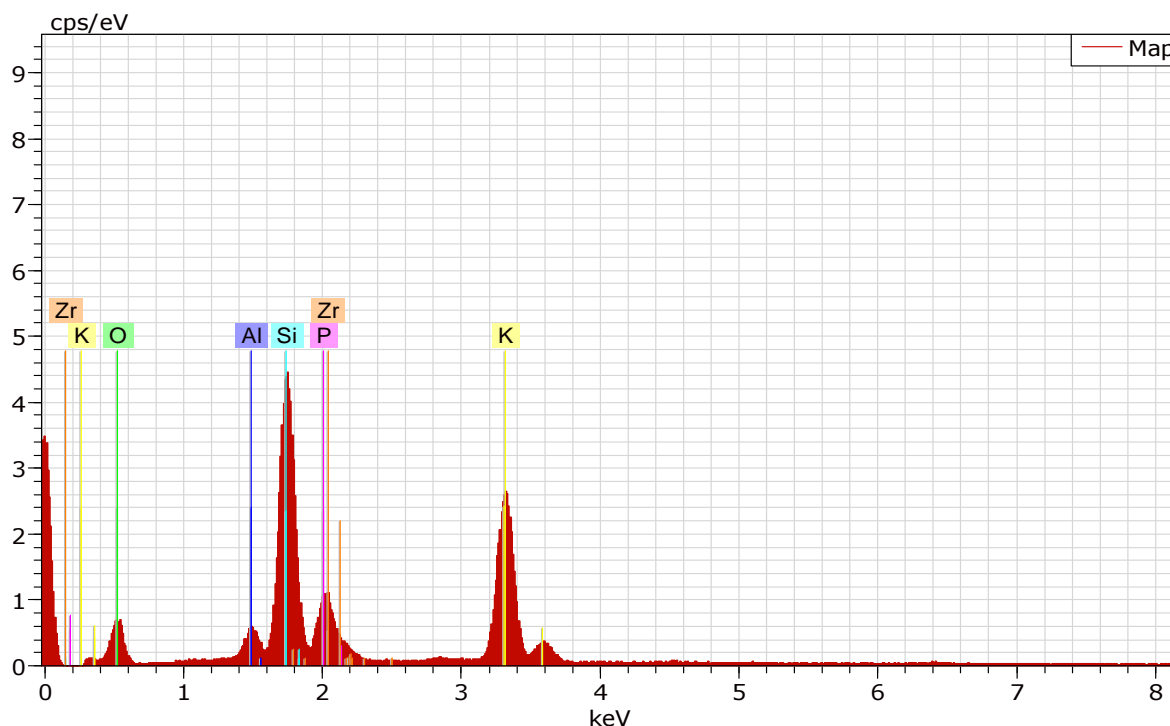


## 7. Lupek 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 – 7 dní

- odlitý, vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C
- forma velká: 280g lupku + 420g geopolymerního kompozitu
- vyroben 15. 12. 2010, nechán 6 dní ležet, pak bylo prováděno měření



Obr. 31. SEM a EDX pohled na povrch geopolymerního kompozitu s obsahem lupku 40%.



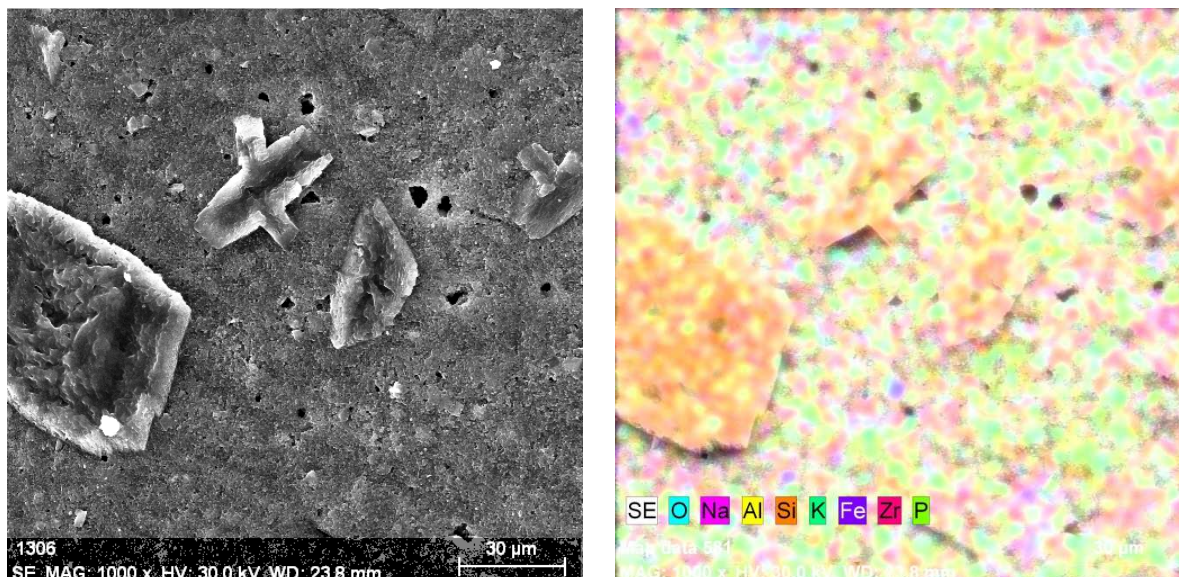
Graf. 10. Energetické spektrum EDX prvků geopolymerního kompozitu s obsahem lupku 40%.

Lupek 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 - 7 dní						
Prvek	O	Al	Si	P	K	Zr
Atom [%]	63,78	2,38	18,65	2,90	11,99	0,31

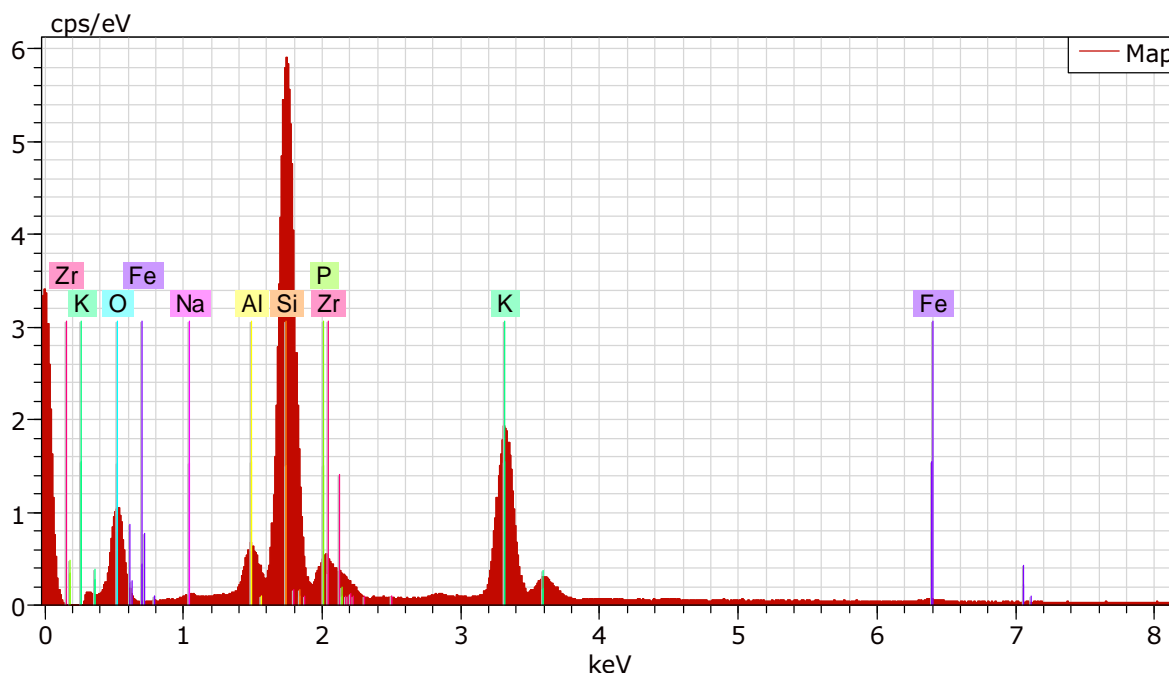
Tab. 3.4.10. Hmotnostní podíly jednotlivých prvků v geopolymerním kompozitu s obsahem lupku 40%.

### 8. Kámen 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 – 7 dní

- odlitý, vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C
- forma velká: 280g kamene + 420g geopolymery
- vyroben 15. 12. 2010, nechán 6 dní ležet, pak bylo prováděno měření



Obr. 32. SEM a EDX pohled na povrch geopolymerního kompozitu s obsahem kamene 40%.



Graf. 11. Energetické spektrum EDX prvků geopolymerního kompozitu s obsahem kamene 40%.

Kámen 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 - 7 dní								
Prvek	O	Na	Al	Si	P	K	Fe	Zr
Atom [%]	62,77	0,64	2,60	24,66	0,76	8,11	0,20	0,27

Tab. 3.4.11. Hmotnostní podíly jednotlivých prvků v geopolymerním kompozitu s obsahem kamene 40%.



### 3.5. Měření rozměrů

Na vyrobených vzorcích a jejich formách jsem měřil rozměry. Pro výpočet průměru byl každý rozměr měřen na více místech. Na vzorcích jsem vyznačil místa, kde se bude vzorek opakovaně měřit během procesu zrání. Měřil jsem šířku, hloubku a délku vzorku.

Během zrání se vzorek mírně prohnul ke spodní straně, což mělo značný vliv na délku vzorku, a proto jsem volil k měření délky místo na vrchní straně.

K měření jsem používal digitální posuvné měřítko.



Obr. 33. Digitální posuvné měřítko PROMA.



Obr. 34. Měření rozměrů vzorků.

### 3.6. Měření hmotnosti

Při procesu zrání také docházelo k úbytku hmotnosti vzorku. Ta byla kontrolována vždy, když docházelo k měření rozměrů.

K měření hmotnosti byla užita digitální váha.



*Obr. 35. Digitální laboratorní váhy DENVER INSTRUMENT XP-3000.*

### **3.7. Měření tvrdosti**

K měření tvrdosti bylo užito digitálního tvrdoměru MH-180 (Leeb tester) se sondou typu D. Tento tvrdoměr měří tvrdost dynamickou (odrazovou) metodou. Jeho hlavní stupnicí je stupnice Leeba (HL), ale přepočítává i do jiných stupnic tvrdosti: HL, HV, HRA, HRB, HRC, HB, HS. Pro mé měření jsem však používal stupnici Vickerse (HV), která je známější. V ojedinělých případech jsem byl nucen použít stupnici Leeba, z důvodů nižší tvrdosti povrchu, jež byla mimo stupnici Vickerse.

Tvrdost byla měřena na třech různých místech spodní strany vzorku. Z naměřených hodnot se vypočítala průměrná tvrdost. K měření docházelo vždy, když se měřila hmotnost a rozměry vzorku. Zjišťoval jsem, zda tvrdost v době zrání klesá nebo stoupá, totéž pak u degradace povrchu.



*Obr. 36. Digitální tvrdoměr MH-180 (Leeb tester).*

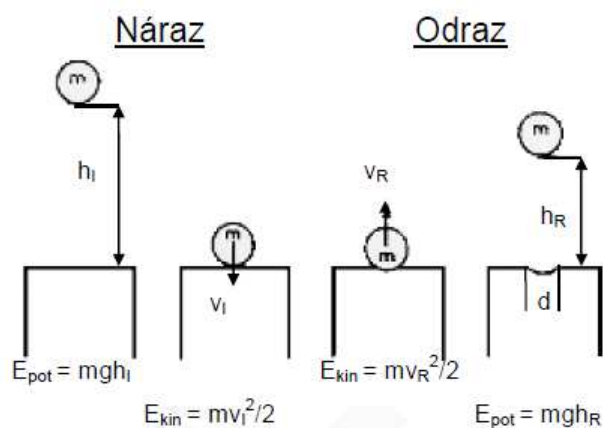
### 3.7.1. Princip měření Leeb tvrdosti (dynamická metoda)

Dynamická metoda se někdy označuje jako odrazová. Měření je prováděno pomocí tvrzené kuličky vystřelené směrem k testovanému objektu. Na povrch naráží definovanou rychlostí resp. kinetickou energií. Nárazem vzniká deformace povrchu, díky které vnikací tělísko ztrácí část své energie. Ztráta energie je tím větší, čím větší je deformace – tedy čím je materiál měkkší. U tvrdších materiálů je deformace menší. Jako vnikací tělísko je použita kulička ze slinutých karbidů, která je vystřelena k testovanému povrchu pružinou, popř. u velmi tvrdých materiálů se užívá kulička diamantová [8].

Ztráta energie je vyjádřena poměrem rychlosti vnikacího tělíska před a po dopadu na testovaný povrch. Tento poměr vyjadřuje jednotku tvrdosti dle Leebe [8]:

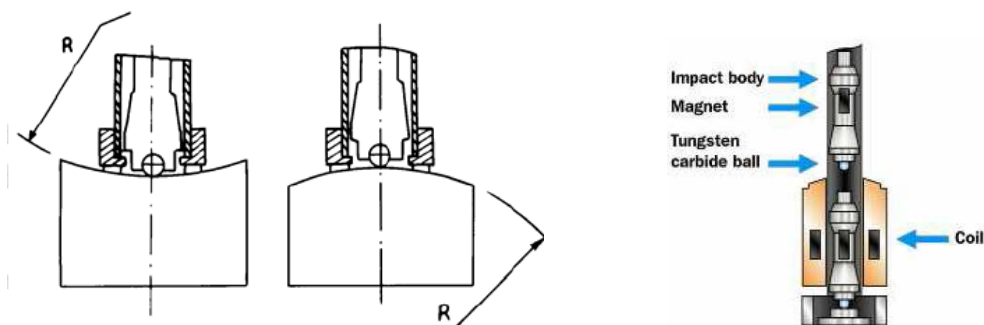
$$HL = \frac{V_R}{V_I} \cdot 1000$$

$V_R$  – rychlost před dopadem,  $V_I$  – rychlost po dopadu



Obr. 37. Princip dynamické metody měření tvrdosti [8].

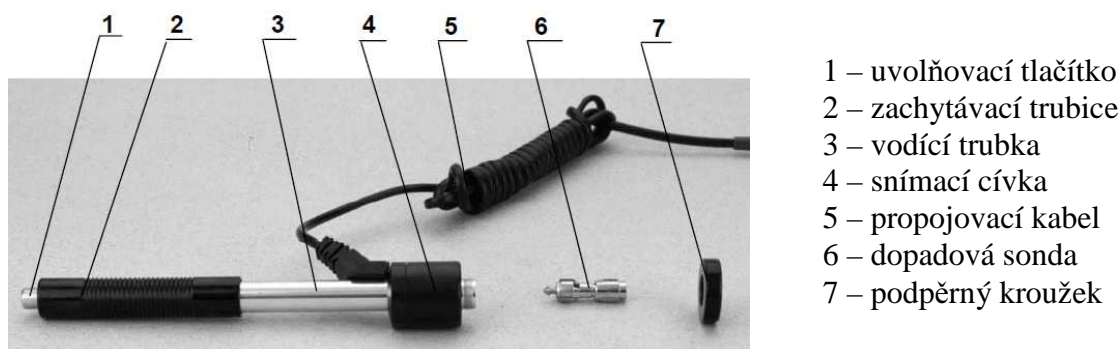
Měřenou hodnotu může ovlivnit (popř. měření znemožnit) celá řada vnějších vlivů: např. tuhost zkoušeného tělesa (jeho geometrie a hmotnost, upevnění), kvalita povrchu, struktura povrchové vrstvy (popř. hloubka jejího odbroušení), opotřebení měřící kuličky [8].



Obr. 38. Měření povrchu sondou (vlevo), průřez měřící sondou (vpravo) [7, 8].

Sonda	Popis použití
D	Základní sonda pro běžné aplikace – zkouška tvrdosti ocelových odlitků, výkovků, hliníkových slitin, měděných slitin, litinové odlitky.
DC	Speciální sonda pro měření ve stísněných místech (např. ve vývrtech), materiál viz. D.
D+15	Speciální štíhlá sonda pro měření ve špatně přístupných místech (např. drážky), materiál viz. D.
G	Zvětšené rozměry a nárazová energie, použití na rozměrnějších a hmotnějších dílech, zvýšená přesnost, ocelové výkovky a odlitky, zápustky, litinové odlitky.
C	Speciální sonda se zmenšenou nárazovou energií pro měření malých a tenkých dílů.
E	Speciální sonda s diamantovým vnikacím tělískem pro měření tvrdých materiálů.

Tab. 3.7.1. Typy a užití jednotlivých sond Leebova tvrdoměru [7].



Obr. 39. Části digitálního tvrdoměru MH-180 (Leeb tester) [7].

### 3.8. Výpočet hustoty a smrštění

Po změření všech potřebných hodnot, jsem vypočítal hustotu a smrštění každého vzorku. Do vzorců pro každou veličinu dosazujeme v jednotkách, které jsou uvedeny v příslušných tabulkách pro každý vzorek.

#### Výpočet hustoty:

$$\text{Hustota } (\rho): \rho = \frac{m}{W \cdot D \cdot L} \cdot 1000 \left[ \frac{g}{cm^3} \right]$$

#### Smrštění po odlití:

$$\text{Šířky (W): } S_{wo} = \frac{S_{wf} - S_{w1}}{S_{wf}} \cdot 100 [\%]$$

$$\text{Hloubka (D): } S_{Do} = \frac{S_{Df} - S_{D1}}{S_{Df}} \cdot 100 [\%]$$

$$\text{Délka (L): } S_{Lo} = \frac{S_{Lf} - S_{L1}}{S_{Lf}} \cdot 100 [\%]$$

#### Smrštění po dobu zrání:

$$\text{Šířky (W): } S_{wz} = \frac{S_{w1} - S_{w4}}{S_{w1}} \cdot 100 [\%]$$

$$\text{Hloubka (D): } S_{Dz} = \frac{S_{D1} - S_{D4}}{S_{D1}} \cdot 100 [\%]$$

#### Vysvětlivky:

m – hmotnost [g]

W – šířka [mm]

D – hloubka [mm]

L – délka [mm]

$S_{wf}$  – šířka formy [mm]

$S_{w1}$  – šířka vzorku po 1. měření [mm]

$S_{w4}$  – šířka vzorku po 4. měření [mm]

$S_{Df}$  – hloubka formy [mm]

$S_{D1}$  – hloubka vzorku po 1. měření [mm]

$S_{D4}$  – hloubka vzorku po 4. měření [mm]

$S_{Lf}$  – délka formy [mm]

$S_{L1}$  – délka vzorku po 1. měření [mm]

$S_{L4}$  – délka vzorku po 4. měření [mm]

$S_{m1}$  – hmotnost vzorku po 1. měření [g]

$S_{m4}$  – hmotnost vzorku po 4. měření [g]



$$\text{Délka (L): } S_{Lz} = \frac{S_{L1}-S_{L4}}{S_{L4}} \cdot 100 [\%]$$

Smrštění celkové:

$$\text{Šířky (W): } S_{wc} = \frac{S_{wf}-S_{w4}}{S_{wf}} \cdot 100 [\%]$$

$$\text{Hloubka (D): } S_{Dc} = \frac{S_{Df}-S_{D4}}{S_{Df}} \cdot 100 [\%]$$

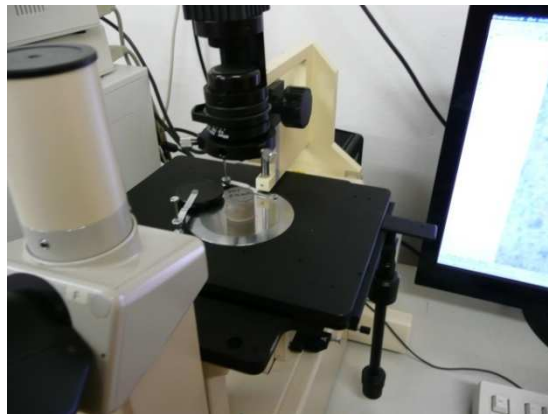
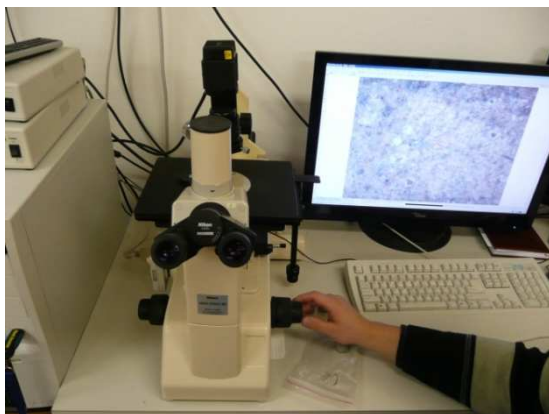
$$\text{Délka (L): } S_{Lc} = \frac{S_{Lf}-S_{L1}}{S_{Lf}} \cdot 100 [\%]$$

Úbytek hmotnosti:

$$S_m = \frac{S_{m1}-S_{m4}}{S_{m1}} \cdot 100 [\%]$$

### 3.9. Pozorování povrchu optickým mikroskopem

Pozorování povrchu probíhalo na optickém mikroskopu. Sledoval jsem změny povrchu během procesu zrání i degradace. Povrchy, které jsem pozoroval, byly odlité, broušené a frézované. Z těchto pozorování jsem pořizoval snímky ve zvětšení 100x a některé i 200x, podle rovnosti povrchu. Na mikroskopu jsem používal pozorování pod odraženým světlem ve světlém poli.



Obr. 40. Pozorování povrchů na optickém mikroskopu NIKON EPIPHOT 200.

### 3.10. Výsledky měření po dobu zrání geopolymerního kompozitu

Vše probíhá v laboratořích při teplotě 18 až 22°C a to při vlhkosti 60 až 70 %.

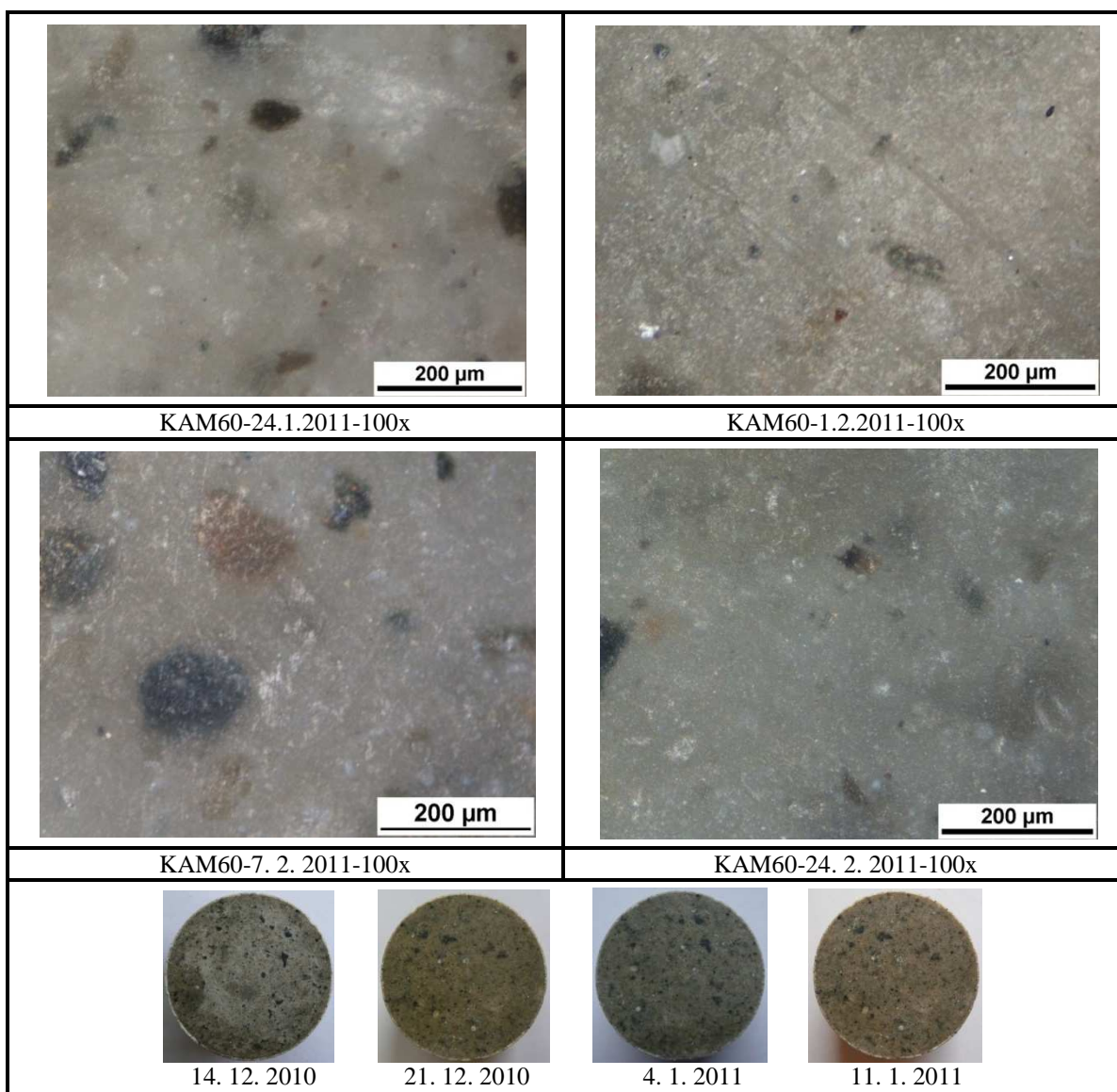
#### 3.10.1. Vzorky vytvrzované při 60°C po 24 hodin

U takto vyrobených vzorků jsem měřil rozměry, tvrdost a hmotnost. Poté jsem dopočítal hustotu a smrštění. Odlitý povrch vzorku (2. typ formy) jsem pozoroval okem a pod mikroskopem. U těchto vzorků nebylo možné změřit rozměry formy, protože při vyklepávání vzorků z formy došlo k jejímu rozbití. Z těchto důvodů jsem mohl pouze spočítat smrštění během zrání.

### 1. Kámen 40% - vytvrzovaný při 60°C po 24 hodin

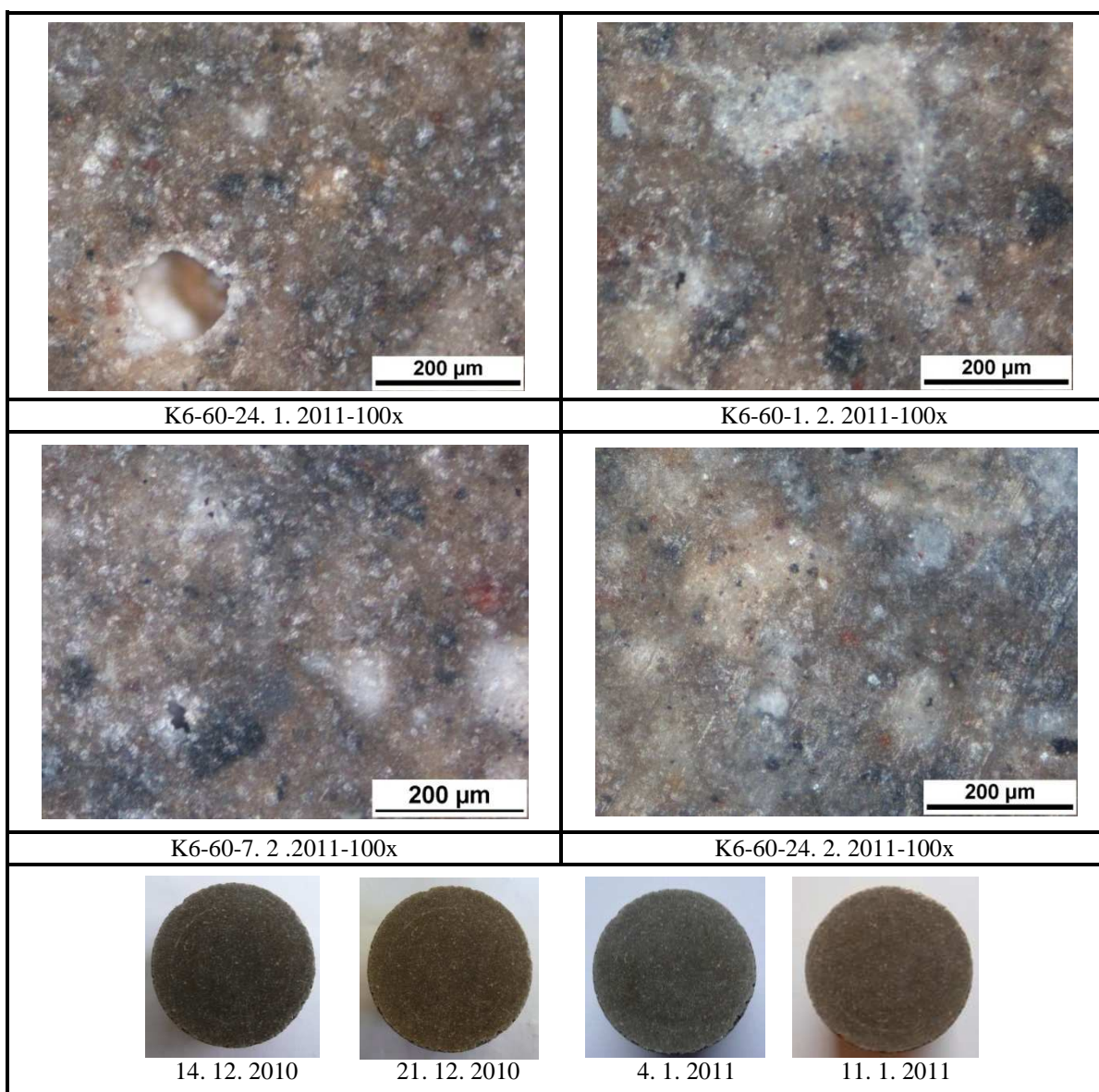
Datum měření	Šířka (W)[mm]	Hloubka (D) [mm]	Délka (L) [mm]	Hmotnost [g]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	1.tvrdost [HV]	2.tvrdost [HV]	3.tvrdost [HV]	Tvrdost (průměr) [HV]
26. 10. 2010	50,13	50,58	110,02	<b>566,9</b>	<b>2,032</b>	224	233	223	<b>227</b>
2. 11. 2010	50,05	50,52	109,79	<b>560,5</b>	<b>2,019</b>	236	241	239	<b>239</b>
16. 11. 2010	49,96	50,45	109,58	<b>552,9</b>	<b>2,002</b>	245	250	248	<b>248</b>
23. 11. 2010	49,95	50,45	109,51	<b>550,0</b>	<b>1,993</b>	246	253	250	<b>250</b>
Smrštění po dobu zrání	<b>0,34%</b>	<b>0,26%</b>	<b>0,40%</b>	<b>2,47%</b>	<i>Tab. 3.10.1. Hodnoty naměřené na vzorku (nahore) + snímky odlitého povrchu z mikroskopu a pohled okem po dobu zrání geopolymerního kompozitu s obsahem kamene 40% (60°C).</i>				

*Tab. 3.10.1. Hodnoty naměřené na vzorku (nahore) + snímky odlitého povrchu z mikroskopu a pohled okem po dobu zrání geopolymerního kompozitu s obsahem kamene 40% (60°C).*



## 2. Popílek K6 40% - vytvrzovaný při 60°C po 24 hodin

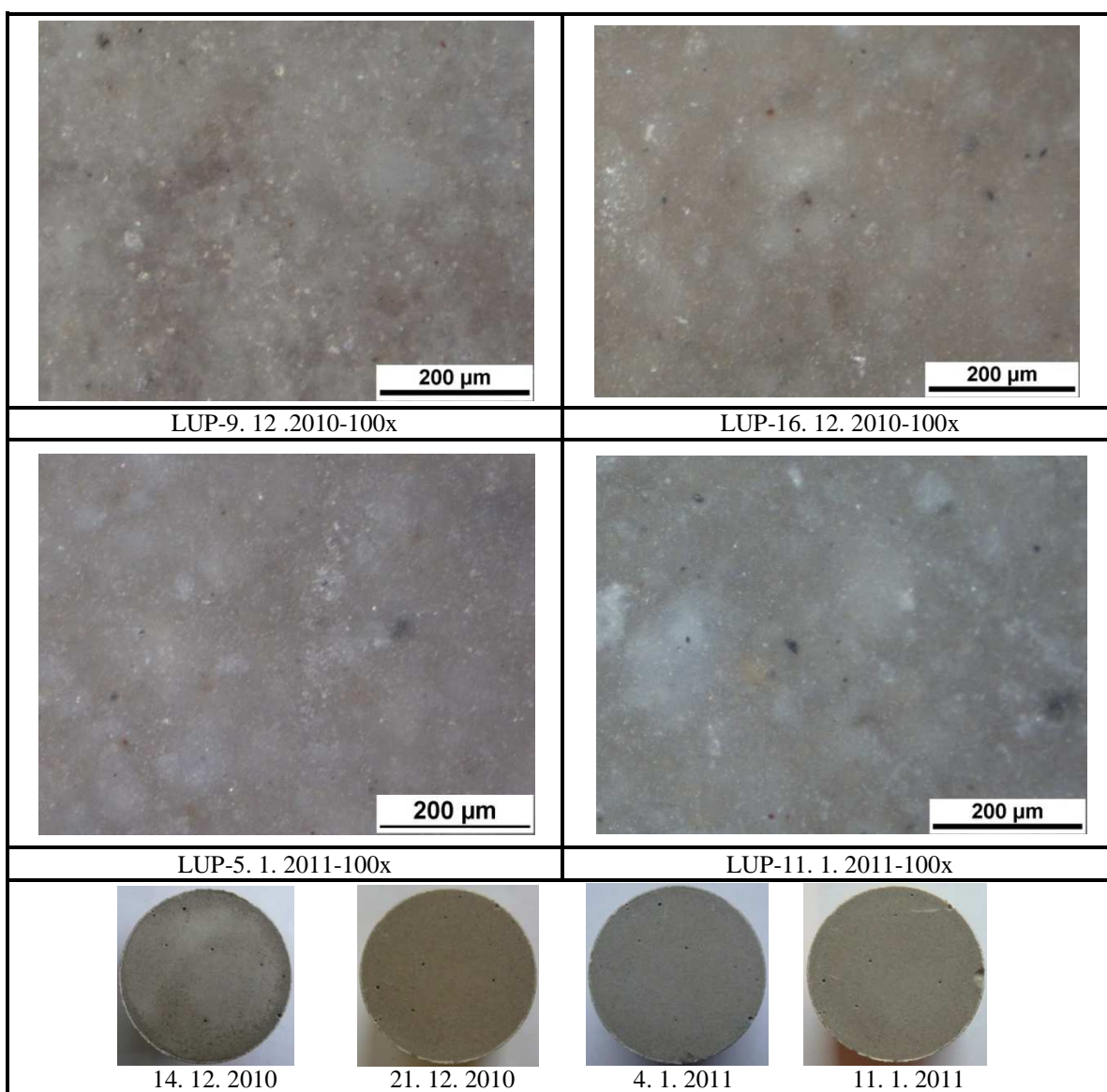
Datum měření	Šířka (W) [mm]	Hloubka (D) [mm]	Délka (L) [mm]	Hmotnost [g]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	1.tvrlost [HV]	2.tvrlost [HV]	3.tvrlost [HV]	Tvrlost (průměr) [HV]
26. 10. 2010	49,93	50,10	109,81	<b>466,9</b>	<b>1,700</b>	141	145	139	<b>142</b>
2. 11. 2010	49,70	50,10	109,64	<b>449,1</b>	<b>1,645</b>	138	149	141	<b>143</b>
16. 11. 2010	49,61	49,94	109,61	<b>433,2</b>	<b>1,595</b>	161	166	155	<b>161</b>
23. 11. 2010	49,54	49,89	109,57	<b>428,1</b>	<b>1,581</b>	175	201	180	<b>185</b>
<b>Smrštění po dobu zrání</b>	<b>0,64%</b>	<b>0,32%</b>	<b>0,18%</b>	<b>7,22%</b>	<i>Tab. 3.10.2. Hodnoty naměřené na vzorku (nahore) + snímky odlitého povrchu z mikroskopu a pohled okem po dobu zrání geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K6 40% (60°C).</i>				





### 3. Lupek 40% - vytvrzovaný při 60°C po 24 hodin

Datum měření	Šířka (W) [mm]	Hloubka (D) [mm]	Délka (L)[mm]	Hmotnost [g]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	1.tvrlost [HV]	2.tvrlost [HV]	3.tvrlost [HV]	Tvrlost (průměr) [HV]
26. 10. 2010	50,98	47,82	109,60	<b>535,6</b>	<b>2,005</b>	194	210	202	<b>202</b>
2. 11. 2010	50,74	47,66	109,24	<b>525,8</b>	<b>1,990</b>	219	228	219	<b>222</b>
16. 11. 2010	50,72	47,55	109,12	<b>518,2</b>	<b>1,969</b>	242	239	231	<b>237</b>
23. 11. 2010	50,72	47,48	109,12	<b>514,9</b>	<b>1,959</b>	250	241	220	<b>237</b>
<b>Smrštění po dobu zrání</b>	<b>0,51%</b>	<b>0,56%</b>	<b>0,44%</b>	<b>3,25%</b>	<i>Tab. 3.10.3. Hodnoty naměřené na vzorku (nahore) + snímky odlitého povrchu z mikroskopu a pohled okem po dobu zrání geopolymerního kompozitu s obsahem lupku 40% (60°C).</i>				



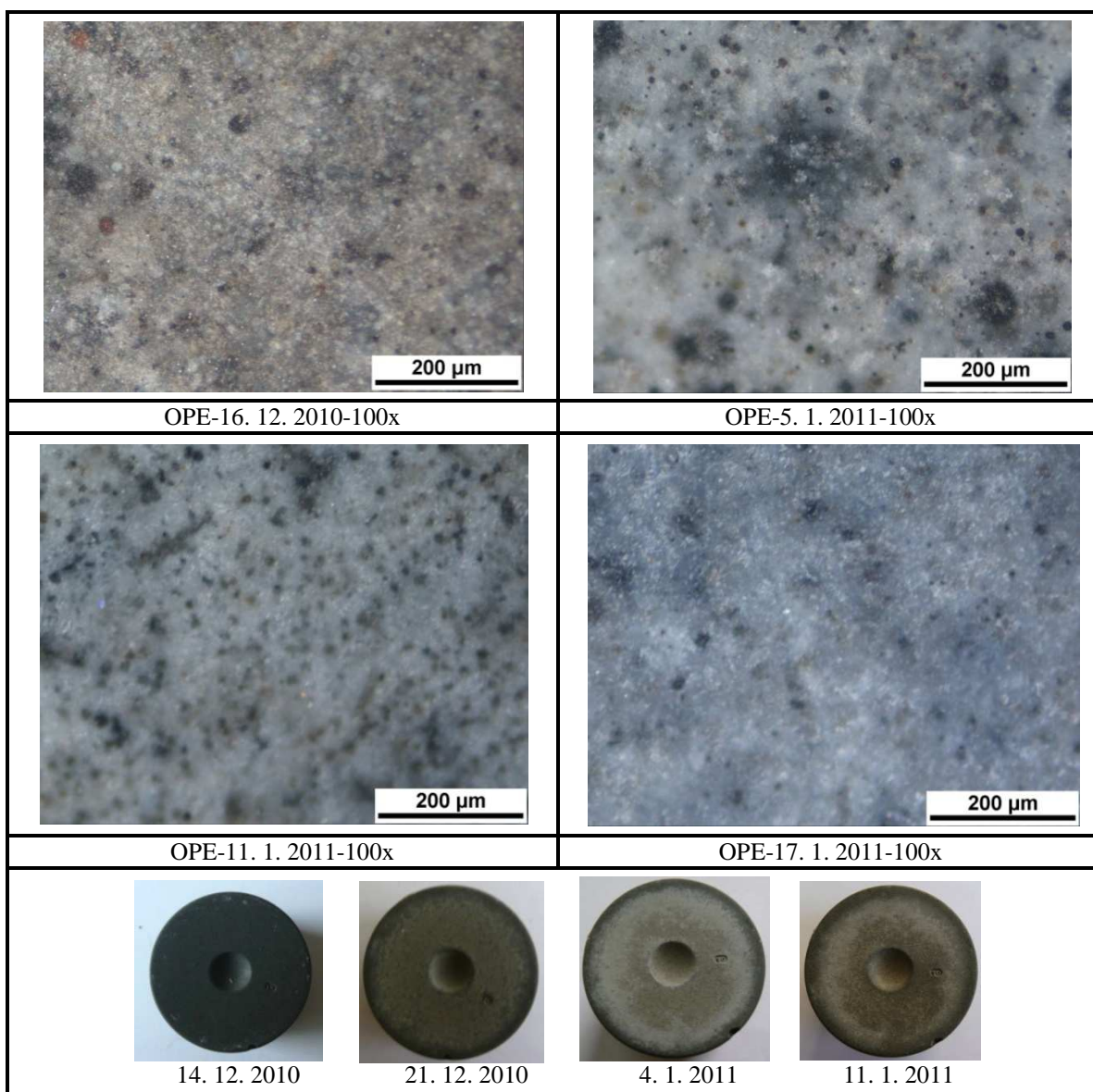
#### 3.10.2. Vzorky vytvrzované při laboratorní teplotě 20°C po 6 až 7 dní

Měření je totožné se vzorky vytvrzovanými v peci. Navíc se měří rozměr formy.



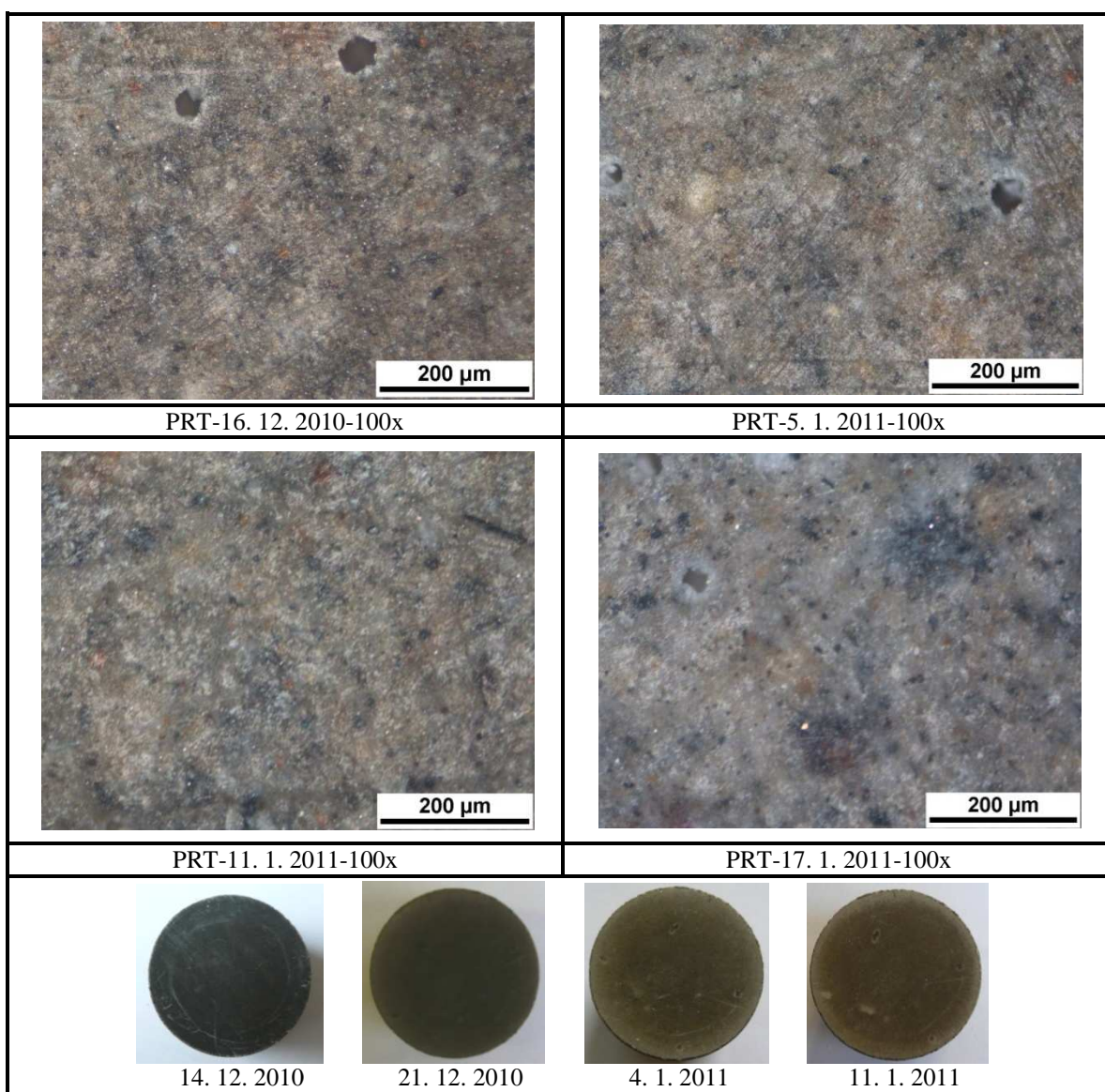
**1. Popílek OPE 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 – 7 dní**

Datum měření	Šířka (W) [mm]	Hloubka (D) [mm]	Délka (L)[mm]	Hmotnost [g]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	1.tvrdost [HV]	2.tvrdost [HV]	3.tvrdost [HV]	Tvrdost (průměr) [HV]
14. 12. 2010	49,37	49,10	110,45	<b>466,00</b>	<b>1,741</b>	119	126	122	<b>122</b>
21. 12. 2010	49,19	48,17	109,52	<b>437,30</b>	<b>1,685</b>	197	188	183	<b>189</b>
4. 1. 2011	49,04	47,63	108,97	<b>428,00</b>	<b>1,682</b>	233	235	222	<b>230</b>
11. 1. 2011	48,97	47,41	108,89	<b>423,70</b>	<b>1,676</b>	242	248	251	<b>247</b>
<b>Rozměry formy</b>	<b>50,83</b>	<b>49,63</b>	<b>112,03</b>	-	<i>Tab. 3.10.4. Hodnoty naměřené na vzorku (nahore) + snímky odlitého povrchu z mikroskopu a pohled okem po dobu zrání geopolymerního kompozitu s obsahem popílku OPE 40%.</i>				
<b>Smrštění po odlití (vytvrzení)</b>	<b>2,87%</b>	<b>1,07%</b>	<b>1,41%</b>	-					
<b>Smrštění po dobu zrání</b>	<b>0,81%</b>	<b>3,44%</b>	<b>1,41%</b>	<b>9,08%</b>					
<b>Smrštění celkové</b>	<b>3,66%</b>	<b>4,47%</b>	<b>2,80%</b>	-					



## 2. Popílek PRT 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 – 7 dní

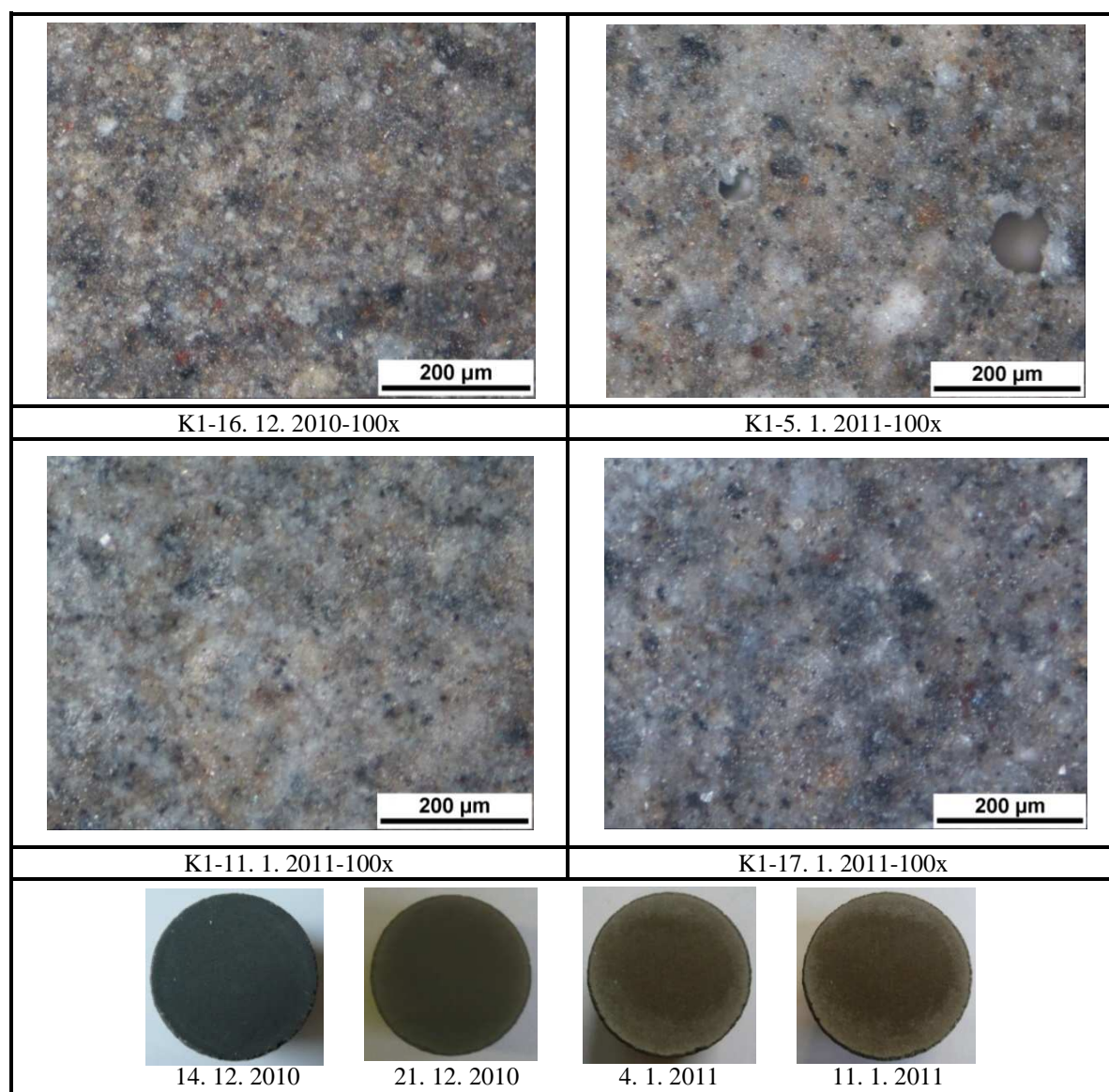
Datum měření	Šířka (W) [mm]	Hloubka (D) [mm]	Délka (L)[mm]	Hmotnost [g]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	1.tvrdost [HV]	2.tvrdost [HV]	3.tvrdost [HV]	Tvrdost (průměr) [HV]
14. 12. 2010	50,66	48,91	110,42	<b>525,30</b>	<b>1,920</b>	140	148	140	<b>143</b>
21. 12. 2010	49,45	48,04	109,53	<b>495,90</b>	<b>1,906</b>	219	208	215	<b>214</b>
4. 1. 2011	49,19	47,76	108,98	<b>483,20</b>	<b>1,887</b>	231	224	222	<b>226</b>
11. 1. 2011	49,16	47,72	108,87	<b>475,80</b>	<b>1,863</b>	259	241	251	<b>250</b>
<b>Rozměry formy</b>	<b>51,16</b>	<b>49,71</b>	<b>112,13</b>	-	<i>Tab. 3.10.5. Hodnoty naměřené na vzorku (nahore) + snímky odlitého povrchu z mikroskopu a pohled okem po dobu zrání geopolymerního kompozitu s obsahem popílku PRT 40%.</i>				
<b>Smrštění po odlití (vytvrzení)</b>	<b>0,98%</b>	<b>1,61%</b>	<b>1,53%</b>	-					
<b>Smrštění po dobu zrání</b>	<b>2,96%</b>	<b>2,43%</b>	<b>1,40%</b>	<b>9,42%</b>					
<b>Smrštění celkové</b>	<b>3,91%</b>	<b>4,00%</b>	<b>2,91%</b>	-					





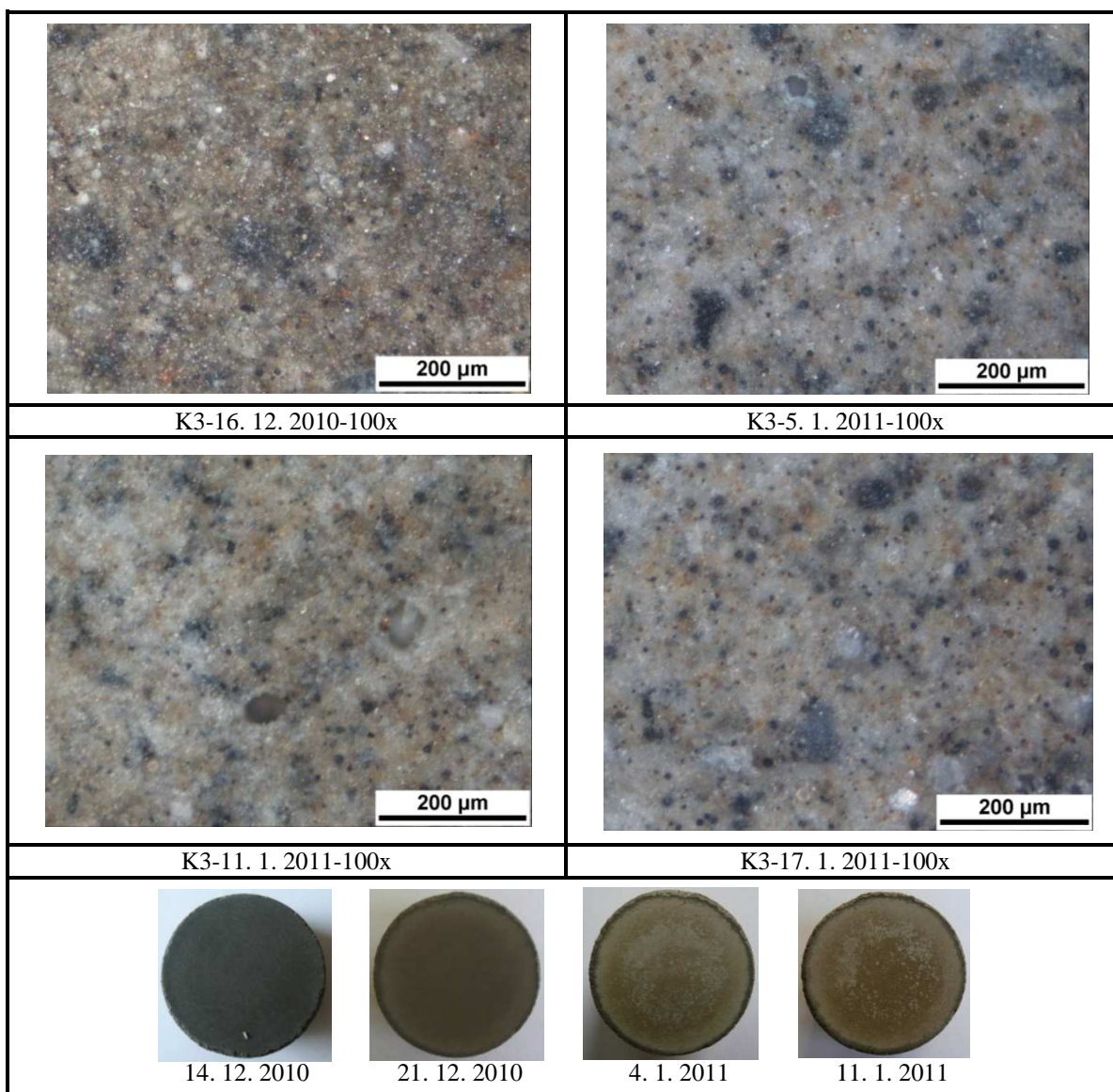
**3. Popílek K1 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 – 7 dní**

Datum měření	Šířka (W) [mm]	Hloubka (D) [mm]	Délka (L)[mm]	Hmotnost [g]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	1.tvrlost [HV]	2.tvrlost [HV]	3.tvrlost [HV]	Tvrlost (průměr) [HV]
14. 12. 2010	49,54	49,78	109,96	<b>512,40</b>	<b>1,890</b>	123	117	128	<b>123</b>
21. 12. 2010	48,87	49,22	109,62	<b>472,50</b>	<b>1,792</b>	173	164	167	<b>168</b>
4. 1. 2011	48,81	49,10	109,33	<b>458,30</b>	<b>1,749</b>	187	171	170	<b>176</b>
11. 1. 2011	48,79	49,08	109,26	<b>451,70</b>	<b>1,726</b>	176	183	177	<b>179</b>
Rozměry formy	50,44	50,13	112,19	-	<i>Tab. 3.10.6. Hodnoty naměřené na vzorku (nahore) + snímky odlitého povrchu z mikroskopu a pohled okem po dobu zrání geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K1 40%.</i>				
Smrštění po odlití (vytvrzení)	1,78%	0,70%	1,99%	-					
Smrštění po dobu zrání	1,51%	1,41%	0,64%	11,85%					
Smrštění celkové	3,27%	2,09%	2,61%	-					



**4. Popílek K3 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 – 7 dní**

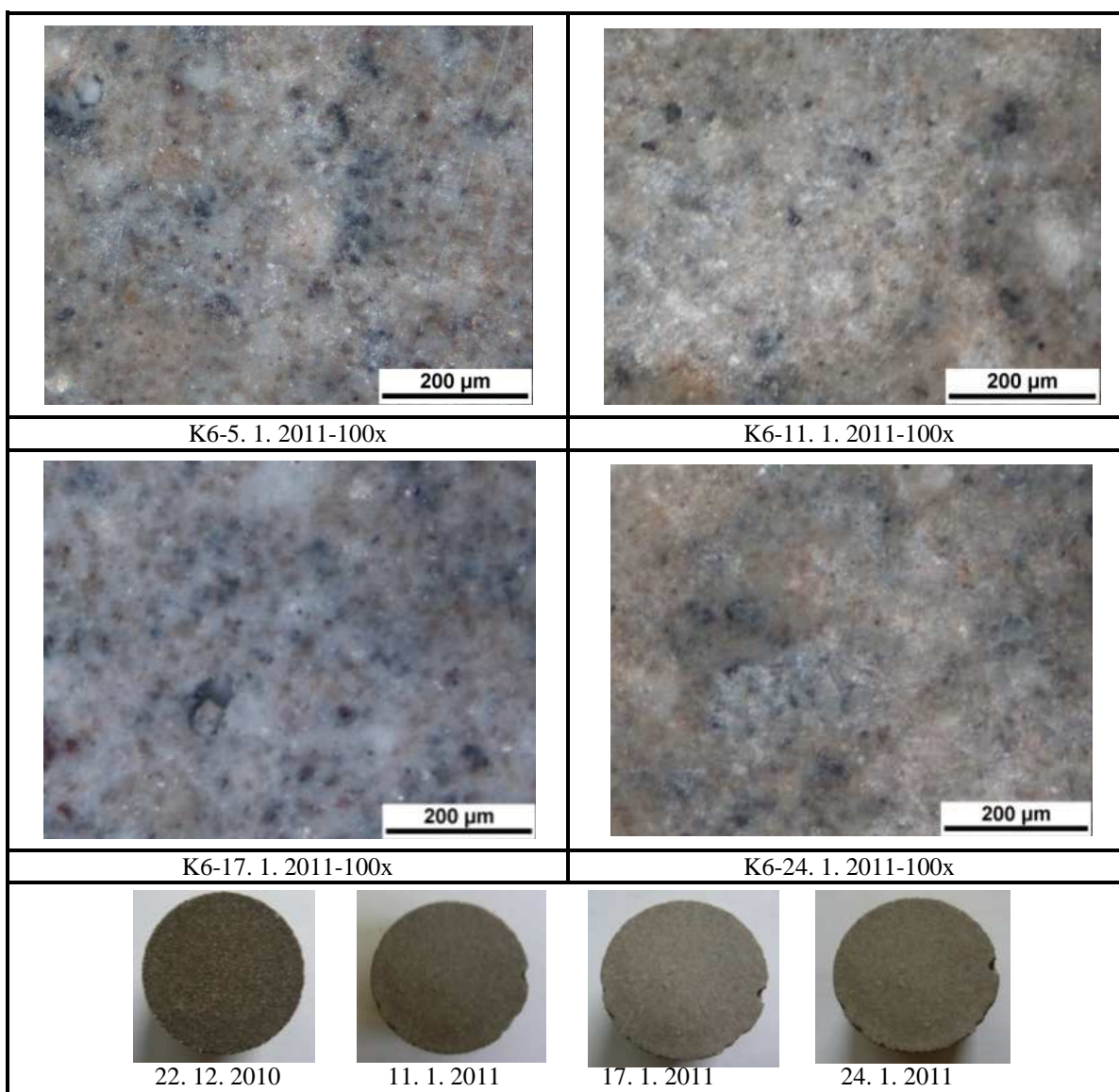
Datum měření	Šířka (W) [mm]	Hloubka (D) [mm]	Délka (L)[mm]	Hmotnost [g]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	1.tvrdost [HV]	2.tvrdost [HV]	3.tvrdost [HV]	Tvrdost (průměr) [HV]
14. 12. 2010	48,49	49,86	110,26	<b>508,50</b>	<b>1,908</b>	117	126	120	<b>121</b>
21. 12. 2010	48,03	49,16	109,84	<b>477,30</b>	<b>1,840</b>	199	192	197	<b>196</b>
4. 1. 2011	47,96	48,85	109,62	<b>463,50</b>	<b>1,805</b>	202	203	197	<b>201</b>
11. 1. 2011	47,89	48,79	109,53	<b>459,70</b>	<b>1,796</b>	208	202	196	<b>202</b>
<b>Rozměry formy</b>	<b>49,17</b>	<b>50,33</b>	<b>112,16</b>	-	<i>Tab. 3.10.7. Hodnoty naměřené na vzorku (nahore) + snímky odlitého povrchu z mikroskopu a pohled okem po dobu zrání geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K3 40%.</i>				
<b>Smrštění po odlití (vytvrzení)</b>	<b>1,38%</b>	<b>0,93%</b>	<b>1,69%</b>	-					
<b>Smrštění po dobu zrání</b>	<b>1,24%</b>	<b>2,15%</b>	<b>0,66%</b>	<b>9,60%</b>					
<b>Smrštění celkové</b>	<b>2,60%</b>	<b>3,06%</b>	<b>2,34%</b>	-					





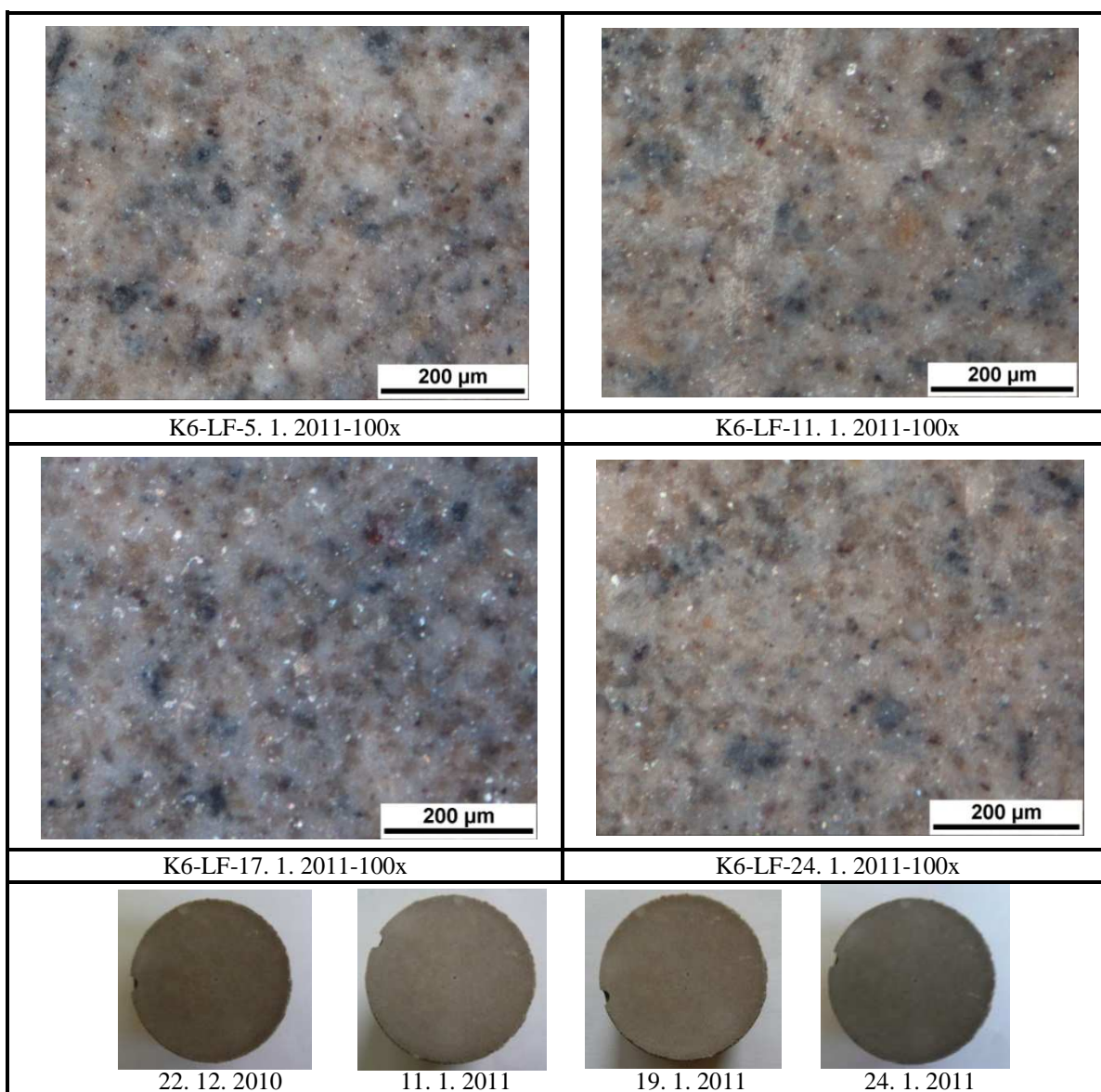
**5. Popílek K6 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 – 7 dní**

Datum měření	Šířka (W) [mm]	Hloubka (D) [mm]	Délka (L)[mm]	Hmotnost [g]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	1.tvrdost [HV]	2.tvrdost [HV]	3.tvrdost [HV]	Tvrdost (průměr) [HV]
21. 12. 2010	49,61	49,79	110,44	<b>525,80</b>	<b>1,927</b>	94	88	96	<b>93</b>
4. 1. 2011	49,45	49,42	109,88	<b>486,40</b>	<b>1,811</b>	238	232	228	<b>233</b>
11. 1. 2011	49,15	49,33	109,77	<b>479,00</b>	<b>1,800</b>	229	238	234	<b>234</b>
17. 1. 2011	49,14	49,31	109,71	<b>474,90</b>	<b>1,786</b>	249	223	239	<b>237</b>
<b>Rozměry formy</b>	<b>50,51</b>	<b>50,35</b>	<b>112,13</b>	-	<i>Tab. 3.10.8. Hodnoty naměřené na vzorku (nahore) + snímky odlitého povrchu z mikroskopu a pohled okem po dobu zrání geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K6 40%.</i>				
<b>Smrštění po odlití (vytvrzení)</b>	<b>1,78%</b>	<b>1,11%</b>	<b>1,51%</b>	-					
<b>Smrštění po dobu zrání</b>	<b>0,95%</b>	<b>0,96%</b>	<b>0,66%</b>	<b>9,68%</b>					
<b>Smrštění celkové</b>	<b>2,71%</b>	<b>2,07%</b>	<b>2,16%</b>	-					



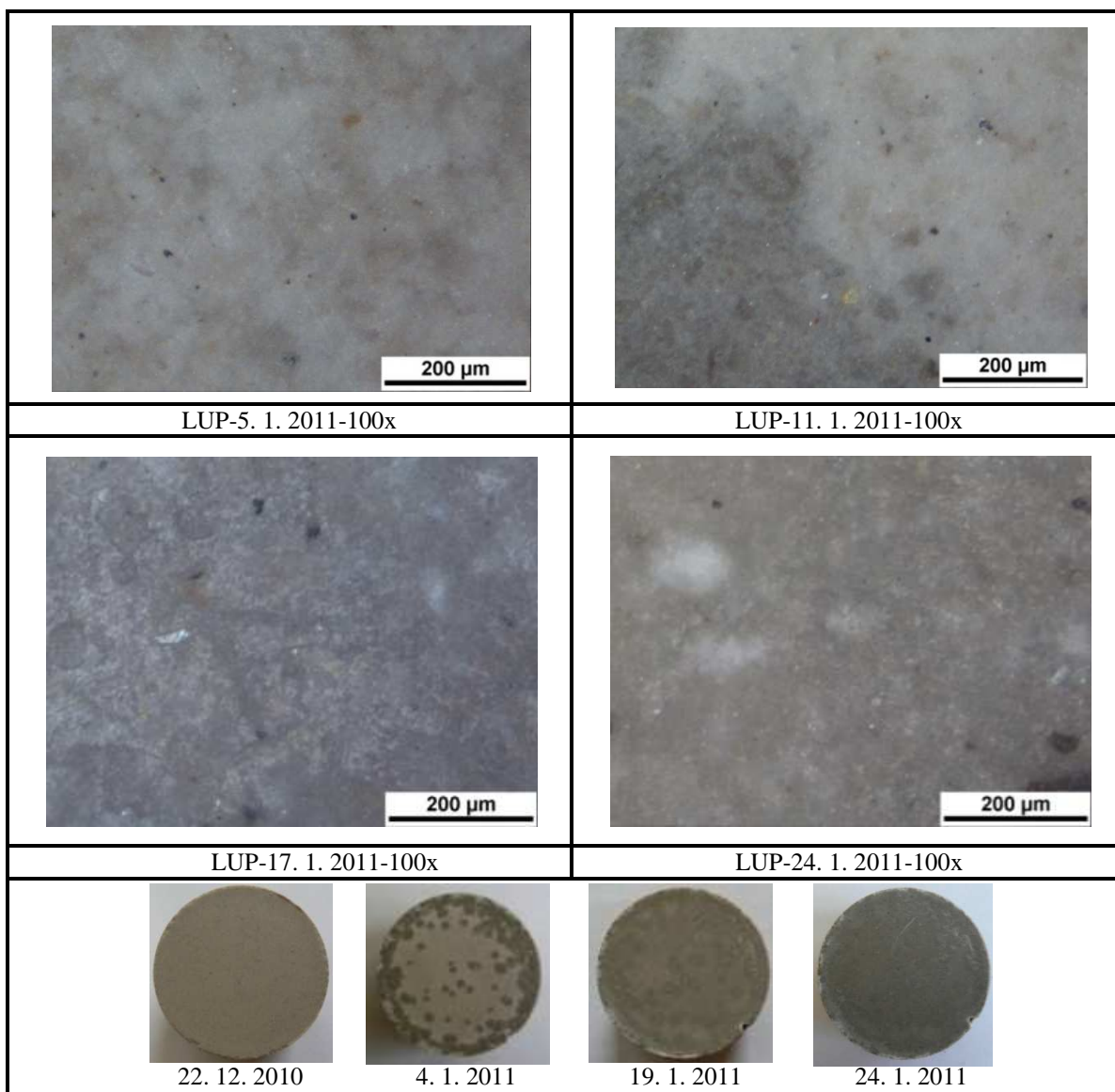
**6. Popílek K6 – LF 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 – 7 dní**

Datum měření	Šířka (W) [mm]	Hloubka (D) [mm]	Délka (L)[mm]	Hmotnost [g]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	1.tvrlost [HV]	2.tvrlost [HV]	3.tvrlost [HV]	Tvrlost (průměr) [HV]
21. 12. 2010	50,57	49,67	109,72	<b>511,70</b>	<b>1,857</b>	103	106	97	<b>102</b>
4. 1. 2011	50,47	49,41	109,39	<b>464,90</b>	<b>1,704</b>	198	205	201	<b>201</b>
11. 1. 2011	50,41	49,32	109,24	<b>454,00</b>	<b>1,672</b>	203	199	201	<b>201</b>
17. 1. 2011	50,40	49,28	109,19	<b>449,30</b>	<b>1,657</b>	199	203	202	<b>201</b>
<b>Rozměry formy</b>	<b>51,11</b>	<b>49,86</b>	<b>112,15</b>	-	<i>Tab. 3.10.9. Hodnoty naměřené na vzorku (nahore) + snímky odlitého povrchu z mikroskopu a pohled okem po dobu zrání geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K6-LF 40%.</i>				
<b>Smrštění po odlití (vytvrzení)</b>	<b>1,06%</b>	<b>0,38%</b>	<b>2,17%</b>	-					
<b>Smrštění po dobu zrání</b>	<b>0,34%</b>	<b>0,79%</b>	<b>0,48%</b>	<b>12,19%</b>					
<b>Smrštění celkové</b>	<b>1,39%</b>	<b>1,16%</b>	<b>2,64%</b>	-					



**7. Lupek 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 – 7 dní**

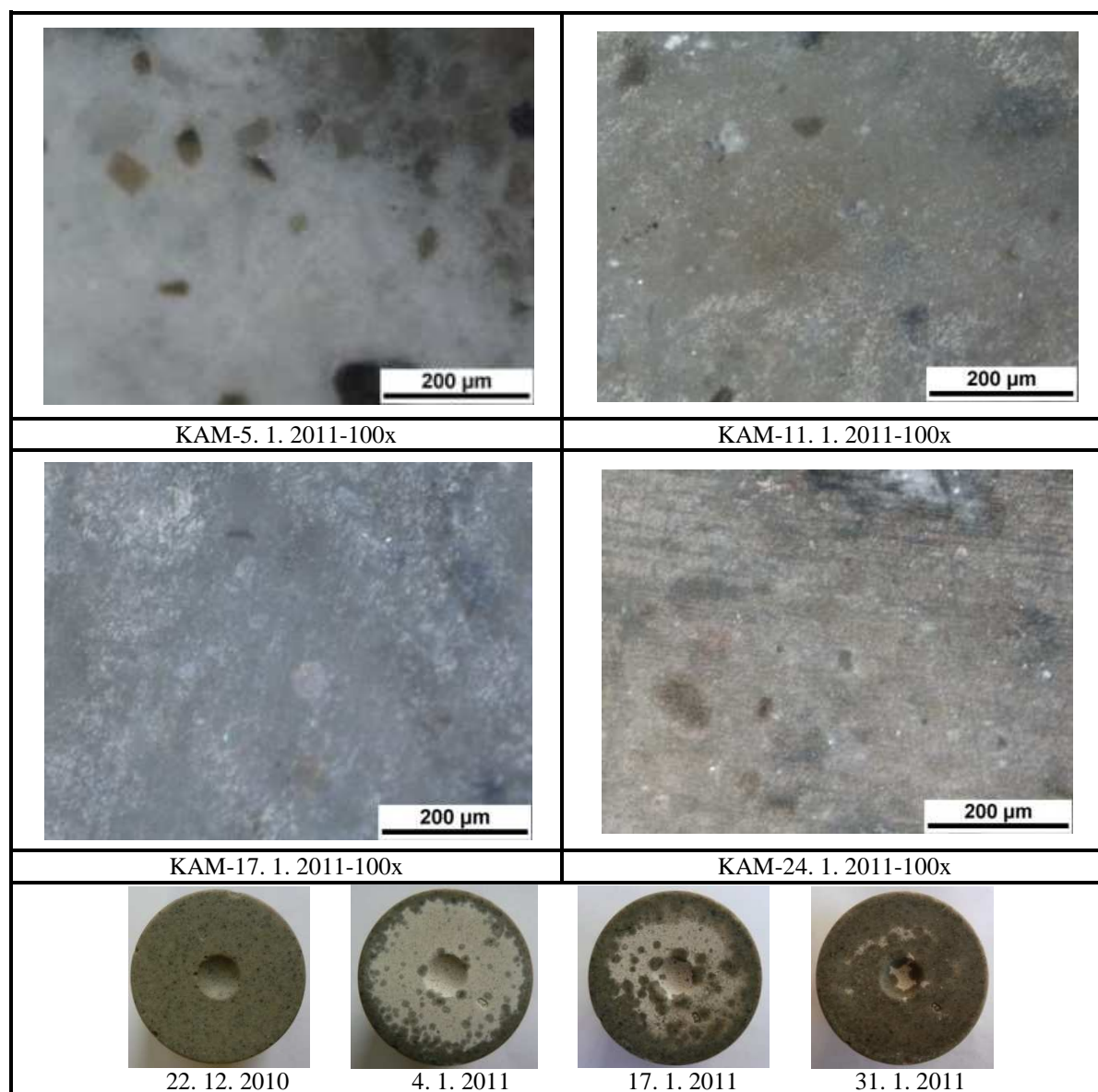
Datum měření	Šířka (W) [mm]	Hloubka (D) [mm]	Délka (L)[mm]	Hmotnost [g]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	1.tvrdost [HV]	2.tvrdost [HV]	3.tvrdost [HV]	Tvrdost (průměr) [HV]
21. 12. 2010	49,13	48,81	110,94	<b>571,00</b>	<b>2,146</b>	169	182	172	<b>174</b>
4. 1. 2011	48,68	48,02	110,35	<b>545,80</b>	<b>2,116</b>	246	249	248	<b>248</b>
11. 1. 2011	48,51	47,81	110,22	<b>538,40</b>	<b>2,106</b>	289	281	279	<b>283</b>
17. 1. 2011	48,50	47,80	109,97	<b>535,80</b>	<b>2,102</b>	289	296	300	<b>295</b>
<b>Rozměry formy</b>	<b>49,22</b>	<b>50,18</b>	<b>112,22</b>	-	<i>Tab. 3.10.10. Hodnoty naměřené na vzorku (nahore) + snímky odlitého povrchu z mikroskopu a pohled okem po dobu zrání geopolymerního kompozitu s obsahem lupku 40%.</i>				
<b>Smrštění po odlití (vytvrzení)</b>	<b>0,18%</b>	<b>2,73%</b>	<b>1,14%</b>	-					
<b>Smrštění po dobu zrání</b>	<b>1,28%</b>	<b>2,07%</b>	<b>0,87%</b>	<b>6,16%</b>					
<b>Smrštění celkové</b>	<b>1,46%</b>	<b>4,74%</b>	<b>2,00%</b>	-					





**8. Kámen 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 – 7 dní**

Datum měření	Šířka (W) [mm]	Hloubka (D) [mm]	Délka (L)[mm]	Hmotnost [g]	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	1.tvrdost [HV]	2.tvrdost [HV]	3.tvrdost [HV]	Tvrdost (průměr) [HV]
21. 12. 2010	49,75	48,86	110,51	<b>574,90</b>	<b>2,140</b>	162	172	161	<b>165</b>
4. 1. 2011	48,97	47,73	110,33	<b>549,90</b>	<b>2,132</b>	257	249	246	<b>251</b>
11. 1. 2011	48,94	47,61	109,77	<b>545,00</b>	<b>2,131</b>	281	294	275	<b>283</b>
17. 1. 2011	48,88	47,58	109,65	<b>542,60</b>	<b>2,128</b>	298	301	299	<b>299</b>
<b>Rozměry formy</b>	<b>50,79</b>	<b>49,45</b>	<b>111,96</b>	-	<i>Tab. 3.10.11. Hodnoty naměřené na vzorku (nahore) + snímky odlitého povrchu z mikroskopu a pohled okem po dobu zrání geopolymerního kompozitu s obsahem kamene 40%.</i>				
<b>Smrštění po odlití (vytvrzení)</b>	<b>2,05%</b>	<b>1,19%</b>	<b>1,30%</b>	-					
<b>Smrštění po dobu zrání</b>	<b>1,75%</b>	<b>2,62%</b>	<b>0,78%</b>	<b>5,62%</b>					
<b>Smrštění celkové</b>	<b>3,76%</b>	<b>3,78%</b>	<b>2,06%</b>	-					





### 3.11. Výsledky měření v degračním prostředí

Vše probíhá v laboratořích při teplotě 18 až 22°C a to při vlhkosti 60 až 70 %. Všechny naměřené hodnoty a obrázky povrchů jsou zpracovány v příslušných tabulkách.

#### 3.11.1. Příprava vzorků do degračního prostředí a jejich měření

Po dostatečném vyzrání (min. 28 dní) jsem nechal vzorky obrobit. Na bočních stěnách vzorků byl obroben povrch z jedné strany frézováním a z druhé broušením. Příslušné strany jsem si označil. Na spodní straně zůstal povrch odlitý. Na obrobených a odlitých površích jsem změřil tvrdost před působením degračního prostředí.

Tyto vzorky jsem rozřezal na tři menší vzorečky a následně jsem ke každému změřil hmotnost. Každý vzoreček jsem dal do různého degračního prostředí. Jako prostředí jsem zvolil vodu, destilovanou vodu a vzduch. Rozřezané vzorky jsem dal do určených nádob s daným prostředím a sledoval po určitý čas jejich tvrdost, hmotnost, povrchy (mikroskopem a okem) a zda nedojde k vylučování dalších látek do daného prostředí.

Měření probíhalo v různě dlouhých intervalech. Po vyndání vzorků z kádinek jsem je nejprve osušil a pak změřil vše potřebné. Následně jsem kádinky umyl a nalil do nich čistou vodu a destilovanou vodu.

Během degradace jsem odebíral vzorky vody a destilované vody pomocí injekční stříkačky, zda nedochází k uvolňování některých prvků nebo sloučenin do daného prostředí. Odběr jsem prováděl do malé válcové nádobky, a to minimálně 2x. Vzorky vody a destilované vody jsem nechal odpařit. Potom jsem nechal provést analýzu EDX.

Po určité době degradace byly vzorky vyndány z kádinek a ponechány 1 týden vyschnout. Následně se změřily potřebné údaje.

































Obr. 41. Injekční stříkačka používaná na odběry (vlevo), kádinky se vzorky (vpravo).

#### 3.11.2. Vzorky vytvrzované při 60°C po 24 hodin

Při obrábění a řezání vzorků nedošlo k žádným potížím.




















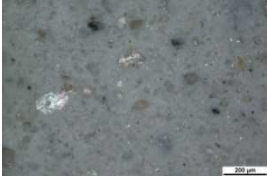
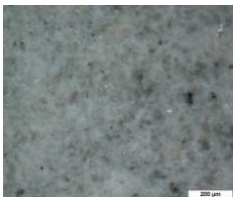






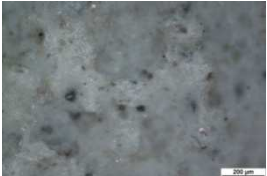
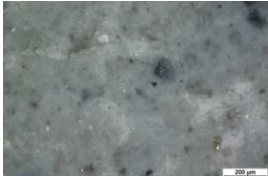

1.1. Kámen 40% - vytvrzovaný při 60°C po 24 hodin - TVRDOST									
	1. Vzorek			2. Vzorek			3. Vzorek		
Datum				4. 12. 2010					
Prostředí				Vzduch (před degradací)					
Typ plochy	broušen			frézován			odlit		
1. tvrd. [HV]	224			234			259		
2. tvrd. [HV]	211			242			263		
3. tvrd. [HV]	239			236			261		
Tvrd.pr. [HV]	225			237			261		
Hmotnost [g]	136,10			136,00			225,70		
Datum				9. 12. 2010					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV, HL]	182	171	97	170	175	268HL	264	260	296
2. tvrd. [HV, HL]	181	181	97	177	168	266HL	271	254	295
3. tvrd. [HV, HL]	178	159	98	180	164	259HL	285	251	278
Tvrd.pr. [HV, HL]	180	170	97	176	169	264HL	273	255	290
Hmotnost [g]	144,70			136,50			221,80		
Datum				16. 12. 2010					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV, HL]	136	115	97	176	105	270HL	277	278	294
2. tvrd. [HV, HL]	127	104	97	166	103	261HL	263	273	288
3. tvrd. [HV, HL]	130	112	98	172	96	244HL	261	275	286
Tvrd.pr. [HV, HL]	131	110	97	171	101	258HL	267	275	289
Hmotnost [g]	143,60			135,40			220,20		
Datum				4. 1. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV, HL]	155	112	270HL	185	144	249HL	277	269	305
2. tvrd. [HV, HL]	147	119	237HL	182	137	225HL	267	264	293
3. tvrd. [HV, HL]	158	111	244HL	190	131	230HL	271	267	308
Tvrd.pr. [HV, HL]	153	114	250HL	186	137	235HL	272	267	302
Hmotnost [g]	142,60			134,50			218,00		
Datum				26. 1. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV, HL]	134	120	222HL	159	125	217HL	284	276	313
2. tvrd. [HV, HL]	131	108	222HL	160	121	223HL	281	277	297
3. tvrd. [HV, HL]	132	111	225HL	162	119	215HL	288	275	306
Tvrd.pr. [HV, HL]	132	113	223HL	160	122	218HL	284	276	305
Hmotnost [g]	141,70			133,80			217,10		
Datum				1. 2. 2011					
Prostředí				Vzduch (vysušení vzorků)					
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV]	204	209	198	222	201	184	281	270	308
2. tvrd. [HV]	216	206	193	212	199	189	285	283	303
3. tvrd. [HV]	209	215	199	212	207	181	288	280	311
Tvrd.pr. [HV]	210	210	197	215	202	185	285	278	307
Hmotnost [g]	126,90			119,10			216,80		

Tab. 3.11.1. Hodnoty naměřené na vzorcích s obsahem kamene 40% (60°C) v degradačním prostředí.

1.2. Kámen 40% - vytvrzovaný při 60°C po 24 hodin - POVRCH – OKO (FOTO)						
	Povrch před vložením	Dat.	5. 1. 2011	26. 1. 2011	1. 2. 2011	
B R		B R				
		V O D A F R				
		O D				
F R		B R				
		D V O D A F R				
		O D				
O D		B R				
		V Z D U C H F R				
		O D				

Tab. 3.11.2. Povrchy vzorků s obsahem kamene 40% (60°C)  
v degradačních prostředích (pohled-foto).








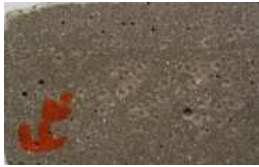

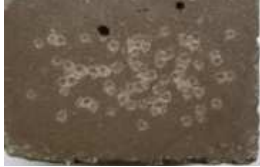




















1.3. Kámen 40% - vytvrzovaný při 60°C po 24 hodin - POVRCH – MIKROSKOP (100x)						
	Povrch před vložením	Dat.	5. 1. 2011	26. 1. 2011	1. 2. 2011	
B R		B R				
		V O D A F R				
		O D				
F R		B R				
		D · V O D A F R				
		O D				
O D		B R				
		V Z D U C H F R				
		O D				

Tab. 3.11.3. Povrchy vzorků s obsahem kamene 40% (60°C) v degračních prostředích (pod mikroskopem).











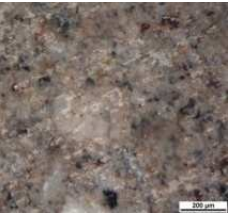









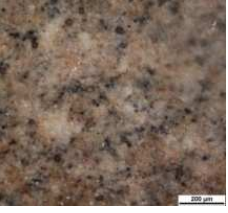









2.1. Popílek K6 40% - vytvrzovaný při 60°C po 24 hodin - TVRDOST									
	1. Vzorek			2. Vzorek			3. Vzorek		
Datum				4. 12. 2010					
Prostředí				Vzduch (před degradací)					
Typ plochy	broušen			frézován			odlit		
1. tvrd. [HV]	201			188			167		
2. tvrd. [HV]	199			189			169		
3. tvrd. [HV]	207			195			171		
Tvrd.pr. [HV]	202			191			169		
Hmotnost [g]	113,20			108,80			109,50		
Datum				9. 12. 2010					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV]	124	128	87	126	103	87	158	168	151
2. tvrd. [HV]	118	118	89	132	102	98	169	165	152
3. tvrd. [HV]	124	120	88	133	101	87	168	161	150
Tvrd.pr. [HV]	122	122	88	130	102	91	165	165	151
Hmotnost [g]	126,00			122,00			106,90		
Datum				16. 12. 2010					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV, HL]	98	92	263HL	127	87	257HL	175	184	163
2. tvrd. [HV, HL]	113	90	266HL	122	89	253HL	168	168	160
3. tvrd. [HV, HL]	113	95	27 HL	120	91	242HL	188	175	162
Tvrd.pr. [HV, HL]	108	92	267HL	123	89	252HL	177	176	162
Hmotnost [g]	125,70			121,50			106,30		
Datum				4. 1. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV, HL]	116	90	287HL	127	91	270HL	179	161	165
2. tvrd. [HV, HL]	117	96	281HL	128	87	262HL	173	176	160
3. tvrd. [HV, HL]	108	89	276HL	123	93	262HL	183	174	163
Tvrd.pr. [HV, HL]	114	92	281HL	126	90	264HL	178	170	163
Hmotnost [g]	126,10			122,20			106,00		
Datum				26. 1. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV, HL]	100	89	252HL	111	87	271HL	180	175	168
2. tvrd. [HV, HL]	102	87	276HL	114	87	260HL	182	170	165
3. tvrd. [HV, HL]	103	90	261HL	114	89	262HL	179	169	170
Tvrd.pr. [HV, HL]	102	89	263HL	113	88	264HL	180	171	167
Hmotnost [g]	125,80			121,90			106,00		
Datum				1. 2. 2011					
Prostředí				Vzduch (vysušení vzorků)					
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV]	124	138	109	117	105	123	186	169	168
2. tvrd. [HV]	134	120	114	121	103	124	180	174	171
3. tvrd. [HV]	132	128	118	122	99	118	179	172	160
Tvrd.pr. [HV]	130	127	114	120	102	122	182	172	166
Hmotnost [g]	107,10			104,80			106,00		

Tab. 3.11.4. Hodnoty naměřené na vzorcích s obsahem popílku K6 40% (60°C) v degradačním prostředí.



2.2. Popílek K6 40% - vytvrzovaný při 60°C po 24 hodin - POVRCH – OKO (FOTO)					
	Povrch před vložením	Dat.	5. 1. 2011	26. 1. 2011	1. 2. 2011
B R		B R			
		V O D A F R			
		O D			
F R		B R			
		D · V O D A F R			
		O D			
O D		B R			
		V Z D U C H F R			
		O D			

Tab. 3.11.5. Povrchy vzorků s obsahem popílku K6 40% (60°C)  
v degračních prostředích (pohled-foto).

2.3. Popálek K6 40% - vytvrzovaný při 60°C po 24 hodin - POVRCH – MIKROSKOP (100x)						
	Před vložení povrch	Dat.	5. 1. 2011	26. 1. 2011	1. 2. 2011	
B R		BR				
		V O D A F R				
		O D				
F R		BR				
		D V O D A F R				
		O D				
O D		BR				
		V Z D U C H F R				
		O D				

Tab. 3.11.6. Povrchy vzorků s obsahem popílku K6 40% (60°C) v degračních prostředích (pod mikroskopem).


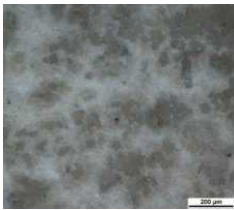




3.1. Lupek 40% - vytvrzovaný při 60°C po 24 hodin - TVRDOST									
	1. Vzorek			2. Vzorek			3. Vzorek		
Datum				4. 12. 2010					
Prostředí				Vzduch (před degradací)					
Typ plochy	broušen			frézován			odlit		
1. tvrd. [HV]	174			162			241		
2. tvrd. [HV]	172			173			239		
3. tvrd. [HV]	182			173			237		
Tvrd.pr. [HV]	176			169			239		
Hmotnost [g]	151,60			143,20			177,40		
Datum				9. 12. 2010					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV]	160	169	219	137	144	195	223	228	239
2. tvrd. [HV]	172	163	214	139	151	199	218	222	245
3. tvrd. [HV]	166	168	204	127	148	209	234	220	234
Tvrd.pr. [HV]	166	167	212	134	148	201	225	223	239
Hmotnost [g]	149,40			144,10			174,50		
Datum				16. 12. 2010					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV]	109	135	118	115	110	122	229	231	257
2. tvrd. [HV]	125	133	107	108	116	129	248	224	246
3. tvrd. [HV]	125	135	114	123	125	116	235	238	263
Tvrd.pr. [HV]	120	134	113	115	117	122	237	231	255
Hmotnost [g]	148,00			142,30			173,40		
Datum				4. 1. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV]	118	168	159	136	158	167	252	243	278
2. tvrd. [HV]	110	167	148	141	139	174	258	247	282
3. tvrd. [HV]	114	164	153	148	142	169	255	251	279
Tvrd.pr. [HV]	114	166	153	142	146	170	255	247	280
Hmotnost [g]	146,80			141,50			171,60		
Datum				26. 1. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV]	112	165	127	138	138	166	250	245	278
2. tvrd. [HV]	115	151	129	146	151	152	256	247	280
3. tvrd. [HV]	110	169	136	137	142	152	258	252	278
Tvrd.pr. [HV]	112	161	130	140	143	157	255	248	279
Hmotnost [g]	146,10			140,60			171,00		
Datum				1. 2. 2011					
Prostředí				Vzduch (vysušení vzorků)					
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV]	219	233	226	204	218	212	252	245	278
2. tvrd. [HV]	202	220	214	206	223	219	256	248	282
3. tvrd. [HV]	210	224	216	211	233	222	259	253	279
Tvrd.pr. [HV]	210	226	219	207	225	218	255	249	280
Hmotnost [g]	130,90			127,50			170,80		

Tab. 3.11.7. Hodnoty naměřené na vzorcích s obsahem lupku 40% (60°C) v deградаčním prostředí.

3.2. Lupek 40% - vytvrzovaný při 60°C po 24 hodin - POVRCH – OKO (FOTO)						
	Povrch před vložením	Dat.	5. 1. 2011	26. 1. 2011	1. 2. 2011	
B R		B R				
		V O D A F R				
		O D				
F R		B R				
		D V O D A F R				
		O D				
O D		B R				
		V Z D U C H F R				
		O D				

Tab. 3.11.8. Povrchy vzorků s obsahem lupku 40% (60°C)  
v degradačních prostředích (pohled-foto).

3.3. Lupek 40% - vytvrzovaný při 60°C po 24 hodin - POVRCH – MIKROSKOP (100x)						
	Povrch před vložení	Dat.	5. 1. 2011	26. 1. 2011	1. 2. 2011	
B R		B R				
		V O D A F R				
		O D				
F R		B R				
		D V O D A F R				
		O D				
O D		B R				
		V Z D U C H F R				
		O D				

Tab. 3.11.9. Povrchy vzorků s obsahem lupku 40% (60°C)  
v degračních prostředích (pod mikroskopem).















**3.11.3. Vzorky vytvrzované při laboratorní teplotě 20°C po 6 až 7 dní**

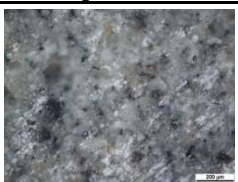

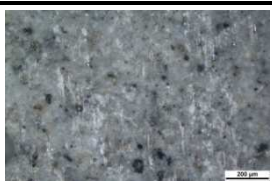
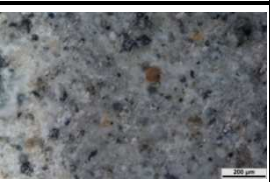
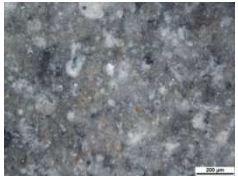
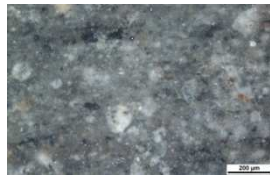


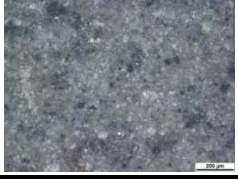


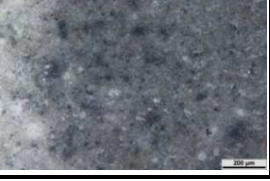
Při obrábění popílku OPE a K6-LF došlo k rozbití vzorku. Příčinou je nevhodné složení, proto tyto druhy popílku bude nutné použít pouze s obsahem 30% a menší. Ze zbytku vzorku popílku OPE bylo možné vybrat jeden vzorek, který jsem nechal degradovat na vzduchu. Při upínání vzorku popílku K1 došlo k rozlomení vzorku na dvě části, a proto byla obrobena větší část (menší nešla upnout). Z těchto důvodů u popílku K1 je vzorek pro degradaci na vzduchu pouze s odlitým povrchem.

1.1. Popílek OPE 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 - 7 dní									
				1. Vzorek					
Datum	14. 3. 2011			21. 3. 2011			28. 3. 2011		
Prostředí	Vzduch (před degradací)			Vzduch			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV]	163	153	212	173	168	218	208	177	214
2. tvrd. [HV]	176	161	208	168	165	212	210	181	222
3. tvrd. [HV]	171	155	204	172	164	215	220	171	214
Tvrd.pr. [HV]	170	156	208	171	166	215	213	176	217
Hmotnost [g]	94,40			94,00			93,50		
Datum	4. 4. 2011			11. 4. 2011			18. 4. 2011		
Prostředí	Vzduch			Vzduch			Vzduch (vysušení vzorků)		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV]	226	191	236	226	196	242	221	202	253
2. tvrd. [HV]	208	192	229	220	200	251	222	200	252
3. tvrd. [HV]	217	192	241	216	191	256	226	197	249
Tvrd.pr. [HV]	217	192	235	221	196	250	223	200	251
Hmotnost [g]	93,40			93,40			93,40		

Tab. 3.11.10. Hodnoty naměřené na vzorcích s obsahem popílku OPE 40% v degračním prostředí.

1.2. Popílek OPE 40% - vytvrzovaný při 20°C po 6 - 7 dní - POVRCH - OKO (FOTO)					
	Povrch před vložením	Dat.	21. 3. 2011	28. 3. 2011	11. 4. 2011
B R  F R  O D		B R  V Z D U C H  O D			
					
					

Tab. 3.11.11. Povrchy vzorku s obsahem popílku OPE 40% v degračních prostředích (pohled-foto).

1.3. Popílek OPE 40% - vytvrzovaný při 20°C po 6 - 7 dní - POVRCH – MIKROSKOP(100x)						
	Povrch před vložením	Dat.	21. 3. 2011	28. 3. 2011	11. 4. 2011	
B R		B R				
F R		V Z D U C H				
O D		O D				

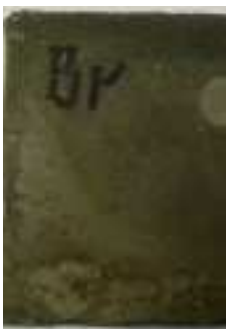







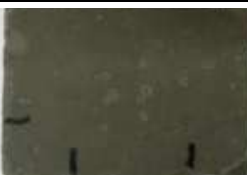
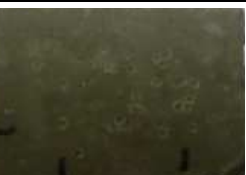




















Tab. 3.11.12. Povrchy vzorku s obsahem popílku OPE 40% v degračních prostředích (pod mikroskopem).



Obr. 42. Rozbitý vzorek od obrábění s obsahem popílku OPE 40%.

















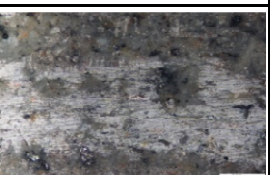
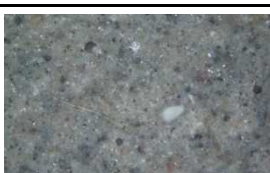



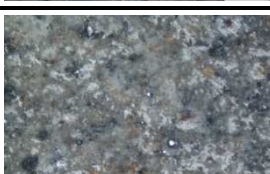
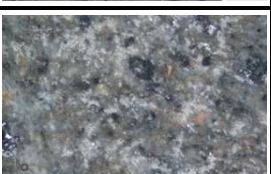
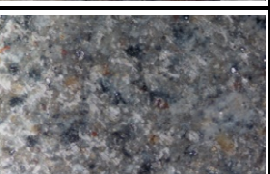


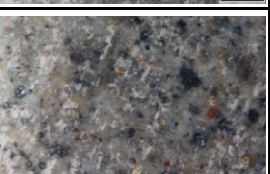


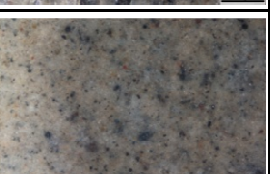
2.1. Popílek PRT 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 - 7 dní									
	1. Vzorek			2. Vzorek			3. Vzorek		
Datum				14. 3. 2011					
Prostředí				Vzduch (před degradací)					
Typ plochy	broušen			frézován			odlit		
1. tvrd. [HV]	233			241			249		
2. tvrd. [HV]	250			238			251		
3. tvrd. [HV]	242			232			250		
Tvrd.pr. [HV]	241			237			250		
Hmotnost [g]	142,80			130,30			143,40		
Datum				21. 3. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV]	163	164	185	138	166	202	274	258	284
2. tvrd. [HV]	178	160	175	155	172	204	271	259	260
3. tvrd. [HV]	186	156	181	145	169	198	270	257	277
Tvrd.pr. [HV]	176	160	180	146	169	201	272	258	274
Hmotnost [g]	148,90			138,20			143,10		
Datum				28. 3. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV]	113	123	146	90	93	139	269	267	277
2. tvrd. [HV]	118	107	124	93	98	136	272	264	290
3. tvrd. [HV]	115	115	137	92	104	141	270	260	286
Tvrd.pr. [HV]	115	115	136	92	98	139	270	264	284
Hmotnost [g]	147,30			136,80			142,50		
Datum				4. 4. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	Odlit
1. tvrd. [HV, HL]	102	98	131	277HL	253HL	139	296	282	303
2. tvrd. [HV, HL]	93	98	127	267HL	265HL	110	292	286	308
3. tvrd. [HV, HL]	96	95	114	270HL	254HL	120	296	288	301
Tvrd.pr. [HV, HL]	97	97	124	271HL	257HL	123	295	285	304
Hmotnost [g]	146,50			136,10			142,20		
Datum				11. 4. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV, HL]	240HL	253HL	129	241HL	235HL	128	301	289	307
2. tvrd. [HV, HL]	250HL	268HL	127	236HL	240HL	109	303	295	310
3. tvrd. [HV, HL]	257HL	247HL	120	239HL	230HL	116	299	297	305
Tvrd.pr. [HV, HL]	249HL	256HL	125	239HL	235HL	118	301	294	307
Hmotnost [g]	145,80			135,80			142,20		
Datum				18. 4. 2011					
Prostředí				Vzduch (vysušení vzorků)					
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV]	172	181	266	184	193	240	298	300	309
2. tvrd. [HV]	181	181	261	181	198	242	300	302	317
3. tvrd. [HV]	175	178	255	193	182	238	301	294	312
Tvrd.pr. [HV]	176	180	261	186	191	240	300	299	313
Hmotnost [g]	132,90			122,80			142,20		

Tab. 3.11.13. Hodnoty naměřené na vzorcích s obsahem popílku PRT 40% v degradačním prostředí.

2.2. Popílek PRT 40% - vytvrzovaný při 20°C po 6 - 7 dní - POVRCH - OKO (FOTO)						
	Povrch před vložením	Dat.	21. 3. 2011	28. 3. 2011	11. 4. 2011	
B R		BR				
		VO D A				
		OD				
F R		BR				
		D · V O D A				
		OD				
O D		BR				
		V Z D U C H				
		OD				

Tab. 3.11.14. Povrchy vzorků s obsahem popílku PRT 40%  
v degračních prostředích (pohled-foto).



























2.3. Popálek PRT 40% - vytvrzovaný při 20°C po 6 - 7 dní - POVRCH - MIKROSKOP(100x)						
	Povrch před vložením	Dat.	21. 3. 2011	28. 3. 2011	11. 4. 2011	
B R		B R				
		V O D A F R				
		O D				
F R		B R				
		D · V O D A F R				
		O D				
O D		B R				
		V Z D U C H F R				
		O D				

Tab. 3.11.15. Povrchy vzorků s obsahem popílku PRT 40% v degračních prostředích (pod mikroskopem).

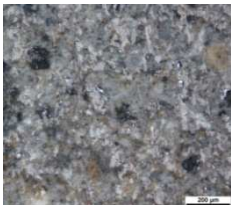









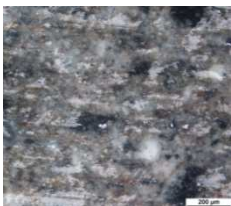







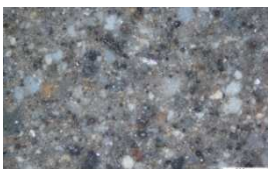

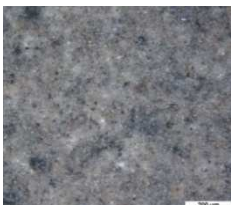





3.1. Popílek K1 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 – 7 dní									
	1. Vzorek			2. Vzorek			3. Vzorek		
Datum				14. 3. 2011					
Prostředí				Vzduch (před degradací)					
Typ plochy	broušen			frézován			odlit		
1. tvrd. [HV]	172			168			182		
2. tvrd. [HV]	172			179			187		
3. tvrd. [HV]	164			180			196		
Tvrd.pr. [HV]	169			176			188		
Hmotnost [g]	91,90			119,30			190,90		
Datum				21. 3. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV]	105	104	97	104	105	90	-	-	186
2. tvrd. [HV]	104	92	99	106	111	93	-	-	191
3. tvrd. [HV]	104	97	94	111	108	85	-	-	196
Tvrd.pr. [HV]	104	98	97	107	108	89	-	-	191
Hmotnost [g]	99,20			132,00			190,60		
Datum				28. 3. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV, HL]	102	101	88	275HL	233HL	209HL	-	-	187
2. tvrd. [HV, HL]	97	91	91	265HL	242HL	216HL	-	-	192
3. tvrd. [HV, HL]	96	96	90	271HL	251HL	203HL	-	-	188
Tvrd.pr. [HV, HL]	98	96	90	270 HL	242HL	209HL	-	-	189
Hmotnost [g]	98,2			130,70			189,80		
Datum				4. 4. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	Odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV, HL]	95	102	91	256HL	231HL	236HL	-	-	217
2. tvrd. [HV, HL]	89	106	84	237HL	217HL	228HL	-	-	231
3. tvrd. [HV, HL]	93	100	87	271HL	232HL	229HL	-	-	220
Tvrd.pr. [HV, HL]	92	103	87	255HL	227HL	231HL	-	-	223
Hmotnost [g]	97,90			130,20			189,40		
Datum				11. 4. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV, HL]	90	96	85	241HL	228HL	231HL	-	-	220
2. tvrd. [HV, HL]	87	91	89	253HL	207HL	219HL	-	-	225
3. tvrd. [HV, HL]	90	95	86	239HL	212HL	215HL	-	-	228
Tvrd.pr. [HV, HL]	89	94	87	244HL	216HL	222HL	-	-	224
Hmotnost [g]	97,60			130,20			189,40		
Datum				18. 4. 2011					
Prostředí				Vzduch (vysušení vzorků)					
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV]	126	135	137	131	112	128	-	-	223
2. tvrd. [HV]	138	140	130	128	116	131	-	-	220
3. tvrd. [HV]	136	132	135	133	115	134	-	-	224
Tvrd.pr. [HV]	133	136	134	131	114	131	-	-	222
Hmotnost [g]	82,50			110,30			189,40		

Tab. 3.11.16. Hodnoty naměřené na vzorcích s obsahem popílku K1 40% v degradačním prostředí.

3.2. Popílek K1 40% - vytvrzovaný při 20°C po 6 - 7 dní - POVRCH - OKO (FOTO)					
	Povrch před vložením	Dat.	21. 3. 2011	28. 3. 2011	11. 4. 2011
B R		B R			
		V O D A F R			
		O D			
F R		B R			
		D · V O D A F R			
		O D			
O D		B R	-	-	-
		V Z D U C H F R	-	-	-
		O D			

Tab. 3.11.17. Povrchy vzorků s obsahem popílku K1 40% v degradačních prostředích (pohled-foto).


















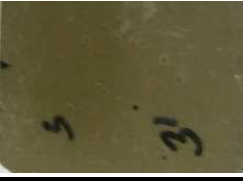




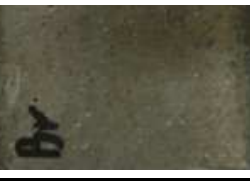
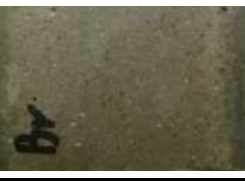






3.3. Popálek K1 40% - vytvrzovaný při 20°C po 6 - 7 dní - POVRCH - MIKROSKOP (100x)					
	Povrch před vložením	Dat.	21. 3. 2011	28. 3. 2011	11. 4. 2011
B R		B R			
		V O D A F R			
		O D			
F R		B R			
		D V O D A F R			
		O D			
O D		B R	-	-	-
		V Z D U C H F R	-	-	-
		O D			

Tab. 3.11.18. Povrchy vzorků s obsahem popílku K1 40% v degračních prostředích (pod mikroskopem).

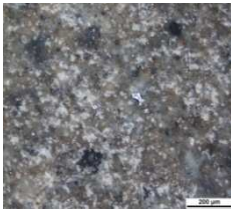


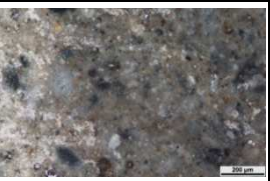



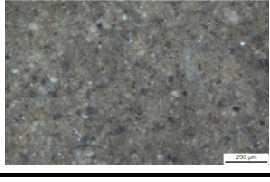


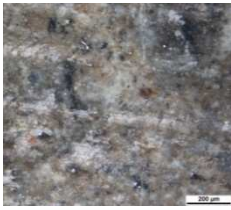


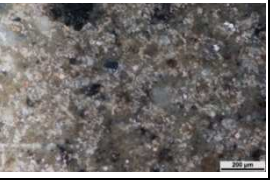





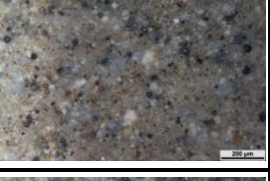
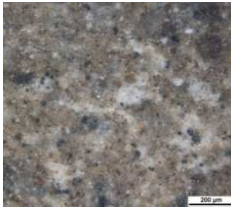








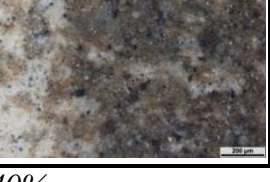
4.1. Popílek K3 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 - 7 dní									
	1. Vzorek			2. Vzorek			3. Vzorek		
Datum				14. 3. 2011					
Prostředí				Vzduch (před degradací)					
Typ plochy	broušen			frézován			odlit		
1. tvrd. [HV]	177			172			219		
2. tvrd. [HV]	174			182			223		
3. tvrd. [HV]	175			177			217		
Tvrd.pr. [HV]	175			177			219		
Hmotnost [g]	133,40			131,80			133,40		
Datum				21. 3. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	Frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV]	144	140	116	148	128	104	207	186	228
2. tvrd. [HV]	147	140	118	152	141	94	221	197	233
3. tvrd. [HV]	153	146	121	157	135	97	216	177	236
Tvrd.pr. [HV]	148	142	118	152	135	98	215	187	232
Hmotnost [g]	139,00			137,50			133,10		
Datum				28. 3. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV, HL]	114	107	100	101	94	244HL	215	209	246
2. tvrd. [HV, HL]	126	116	101	98	99	250HL	220	187	240
3. tvrd. [HV, HL]	118	109	100	108	90	246HL	223	201	235
Tvrd.pr. [HV, HL]	119	111	100	102	94	247HL	219	199	240
Hmotnost [g]	137,30			135,60			132,50		
Datum				4. 4. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV, HL]	117	108	104	91	95	253HL	239	220	259
2. tvrd. [HV, HL]	123	110	110	93	101	255HL	242	219	261
3. tvrd. [HV, HL]	120	112	110	89	97	251HL	238	225	258
Tvrd.pr. [HV, HL]	120	110	108	91	98	253HL	240	221	259
Hmotnost [g]	136,70			134,90			132,00		
Datum				11. 4. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV, HL]	124	107	110	270HL	88	248HL	255	242	272
2. tvrd. [HV, HL]	121	112	102	271HL	89	258HL	262	236	278
3. tvrd. [HV, HL]	129	103	106	271HL	92	241HL	259	234	266
Tvrd.pr. [HV, HL]	125	107	106	271HL	90	249HL	259	237	272
Hmotnost [g]	136,30			134,60			132,00		
Datum				18. 4. 2011					
Prostředí				Vzduch (vysušení vzorků)					
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV]	164	166	180	164	158	162	256	233	276
2. tvrd. [HV]	161	175	179	168	166	161	250	245	280
3. tvrd. [HV]	168	171	175	170	162	167	257	251	282
Tvrd.pr. [HV]	164	171	178	167	162	163	254	243	279
Hmotnost [g]	120,10			119,90			132,00		

Tab. 3.11.19. Hodnoty naměřené na vzorcích s obsahem popílku K3 40% v degradačním prostředí.



4.2. Popílek K3 40% - vytvrzovaný při 20°C po 6 - 7 dní - POVRCH - OKO (FOTO)					
	Povrch před vložením	Dat.	21. 3. 2011	28. 3. 2011	11. 4. 2011
B R		B R			
		V O D A F R			
		O D			
F R		B R			
		D V O D A F R			
		O D			
O D		B R			
		V Z D U C H F R			
		O D			

Tab. 3.11.20. Povrchy vzorků s obsahem popílku K3 40% v degračních prostředích (pohled-foto).































4.3. Popálek K3 40% - vytvrzovaný při 20°C po 6 - 7 dní - POVRCH - MIKROSKOP (100x)						
	Povrch před vložením	Dat.	21. 3. 2011	28. 3. 2011	11. 4. 2011	
B R		B R				
		V O D A F R				
		O D				
F R		B R				
		D V O D A F R				
		O D				
O D		B R				
		V Z D U C H F R				
		O D				

Tab. 3.11.21. Povrchy vzorků s obsahem popílku K3 40%  
v degračních prostředích (pod mikroskopem).












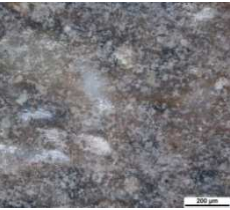








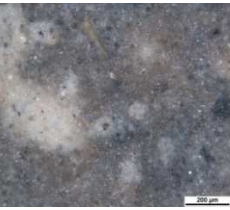








5.1. Popílek K6 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 - 7 dní									
	1. Vzorek			2. Vzorek			3. Vzorek		
Datum				14. 3. 2011					
Prostředí				Vzduch (před degradací)					
Typ plochy	broušen			frézován			odlit		
1. tvrd. [HV]	215			259			248		
2. tvrd. [HV]	229			247			239		
3. tvrd. [HV]	221			234			245		
Tvrd.pr. [HV]	222			247			244		
Hmotnost [g]	111,20			102,50			198,70		
Datum				21. 3. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	Frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV]	170	206	152	137	133	118	228	255	259
2. tvrd. [HV]	179	198	162	139	127	136	215	253	245
3. tvrd. [HV]	174	197	157	132	117	131	225	241	256
Tvrd.pr. [HV]	174	200	157	136	126	128	223	250	253
Hmotnost [g]	115,90			106,20			197,60		
Datum				28. 3. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV]	164	169	150	108	117	132	222	259	271
2. tvrd. [HV]	171	180	155	120	119	123	237	260	286
3. tvrd. [HV]	168	178	148	113	123	128	229	250	289
Tvrd.pr. [HV]	168	176	151	114	120	128	229	256	282
Hmotnost [g]	114,60			104,70			196,40		
Datum				4. 4. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV]	164	186	175	88	102	96	241	272	288
2. tvrd. [HV]	184	169	177	106	90	103	244	269	279
3. tvrd. [HV]	171	182	166	97	91	89	239	271	285
Tvrd.pr. [HV]	173	179	173	97	94	96	241	271	284
Hmotnost [g]	114,00			104,00			195,80		
Datum				11. 4. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV, HL]	161	185	150	100	96	276HL	266	272	291
2. tvrd. [HV, HL]	172	183	167	93	92	286HL	252	276	290
3. tvrd. [HV, HL]	167	194	159	88	89	272HL	255	289	294
Tvrd.pr. [HV, HL]	167	187	159	94	92	278HL	258	279	292
Hmotnost [g]	113,60			103,6			195,70		
Datum				18. 4. 2011					
Prostředí				Vzduch (vysušení vzorků)					
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV]	244	265	243	180	182	190	269	292	300
2. tvrd. [HV]	233	260	251	185	189	198	273	288	302
3. tvrd. [HV]	236	271	248	178	185	193	266	280	308
Tvrd.pr. [HV]	238	265	247	181	185	194	269	287	303
Hmotnost [g]	101,80			93,50			195,60		

Tab. 3.11.22. Hodnoty naměřené na vzorcích s obsahem popílku K6 40% v degradačním prostředí.

5.2. Popílek K6 40% - vytvrzovaný při 20°C po 6 - 7 dní - POVRCH - OKO (FOTO)						
	Povrch před vložením	Dat.	21. 3. 2011	28. 3. 2011	11. 4. 2011	
B R		B R				
		V O D A F R				
		O D				
F R		B R				
		D · V O D A F R				
		O D				
O D		B R				
		V Z D U C H F R				
		O D				

Tab. 3.11.23. Povrchy vzorků s obsahem popílku K6 40% v degračních prostředích (pohled-foto).






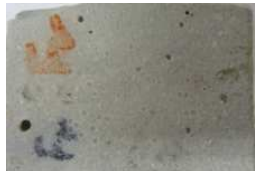


























5.3. Popálek K6 40% - vytvrzovaný při 20°C po 6 - 7 dní - POVRCH - MIKROSKOP (100x)						
	Povrch před vložením	Dat.	21. 3. 2011	28. 3. 2011	11. 4. 2011	
B R		B R				
		V O D A F R				
		O D				
F R		B R				
		D V O D A F R				
		O D				
O D		B R				
		V Z D U C H F R				
		O D				

Tab. 3.11.24. Povrchy vzorků s obsahem popílku K6 40% v degračních prostředích (pod mikroskopem).

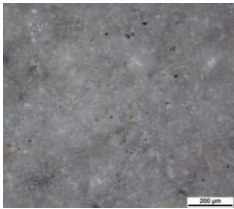


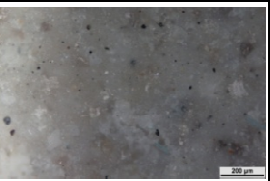

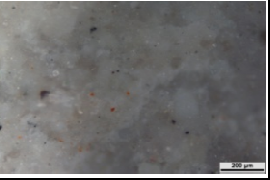
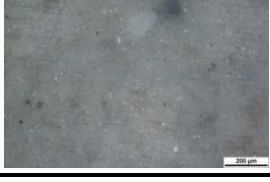






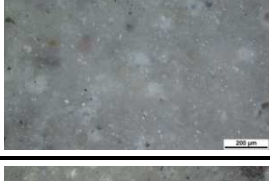
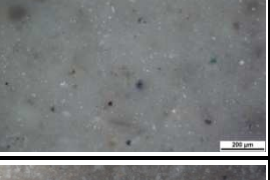


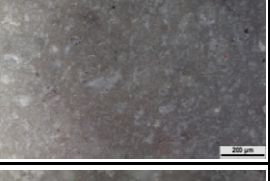





6.1. Lupek 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 - 7 dní									
	1. Vzorek			2. Vzorek			3. Vzorek		
Datum				14. 3. 2011					
Prostředí				Vzduch (před degradací)					
Typ plochy	broušen			frézován			odlit		
1. tvrd. [HV]	268			260			300		
2. tvrd. [HV]	283			265			293		
3. tvrd. [HV]	273			273			311		
Tvrd.pr. [HV]	275			266			301		
Hmotnost [g]	156,20			154,40			155,70		
Datum				21. 3. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV]	111	98	121	112	97	94	294	279	305
2. tvrd. [HV]	116	96	128	110	100	90	284	270	301
3. tvrd. [HV]	111	103	127	114	102	87	297	276	312
Tvrd.pr. [HV]	113	99	125	112	100	90	292	275	306
Hmotnost [g]	152,60			150,60			155,20		
Datum				28. 3. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV, HL]	94	91	119	267HL	266HL	222HL	304	280	315
2. tvrd. [HV, HL]	104	87	108	292HL	287HL	224HL	308	279	308
3. tvrd. [HV, HL]	92	87	112	280HL	273HL	231HL	295	278	316
Tvrd.pr. [HV, HL]	97	88	113	280HL	275HL	226HL	302	279	313
Hmotnost [g]	150,60			148,50			154,30		
Datum				4. 4. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV, HL]	269HL	270HL	117	251HL	284HL	236HL	308	287	318
2. tvrd. [HV, HL]	253HL	256HL	107	233HL	279HL	244HL	295	286	315
3. tvrd. [HV, HL]	283HL	250HL	114	240HL	267HL	246HL	302	279	305
Tvrd.pr. [HV, HL]	268HL	259HL	113	241HL	277HL	242HL	302	284	312
Hmotnost [g]	149,70			147,40			154,20		
Datum				11. 4. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV, HL]	240HL	276HL	111	238HL	235HL	244HL	306	288	312
2. tvrd. [HV, HL]	238HL	283HL	123	231HL	243HL	241HL	298	294	322
3. tvrd. [HV, HL]	234HL	266HL	105	228HL	251HL	248HL	311	292	319
Tvrd.pr. [HV, HL]	237HL	275HL	113	232HL	243HL	244HL	305	291	318
Hmotnost [g]	148,80			146,90			154,20		
Datum				18. 4. 2011					
Prostředí				Vzduch (vysušení vzorků)					
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV]	196	202	287	152	155	192	307	288	327
2. tvrd. [HV]	204	195	292	152	158	187	313	297	321
3. tvrd. [HV]	200	198	296	150	151	196	305	291	311
Tvrd.pr. [HV]	200	198	292	151	155	192	308	292	320
Hmotnost [g]	137,30			135,30			154,10		

Tab. 3.11.25. Hodnoty naměřené na vzorcích s obsahem lupku 40% v degradačním prostředí.

6.2. Lupek 40% - vytvrzovaný při 20°C po 6 - 7 dní - POVRCH -OKO (FOTO)						
	Povrch před vložením	Dat.	21. 3. 2011	28. 3. 2011	11. 4. 2011	
B R		B R				
		V O D A F R				
		O D				
F R		B R				
		D V O D A F R				
		O D				
O D		B R				
		V Z D U C H F R				
		O D				

Tab. 3.11.26. Povrchy vzorků s obsahem lupku 40% v degradačních prostředích (pohled-foto).












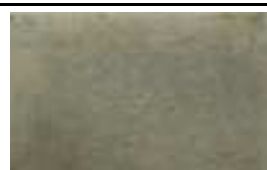







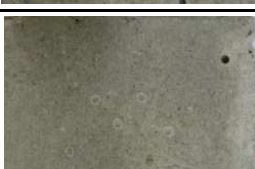

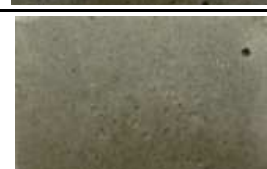









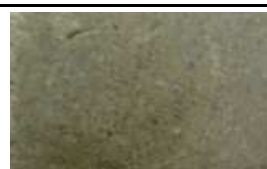
6.3. Lupek 40% - vytvrzovaný při 20°C po 6 - 7dní - POVRCH - MIKROSKOP (100x)						
	Povrch před vložením	Dat.	21. 3. 2011	28. 3. 2011	11. 4. 2011	
B R		B R				
		V O D A F R				
		O D				
F R		B R				
		D · V O D A F R				
		O D				
O D		B R				
		V Z D U C H F R				
		O D				

Tab. 3.11.27. Povrchy vzorků s obsahem lupku 40% v degračních prostředích (pod mikroskopem).



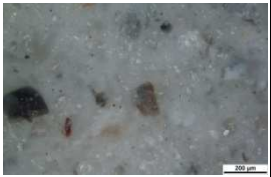


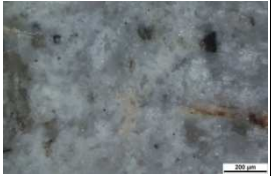


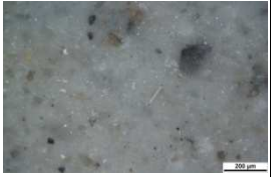







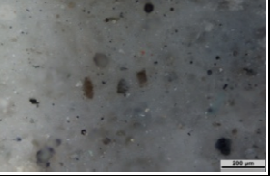









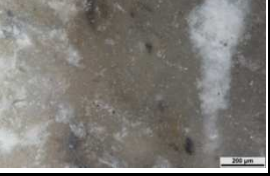


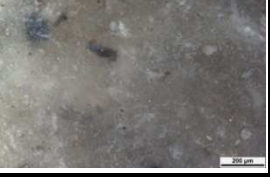


7.1. Kámen 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 - 7 dní									
	1. Vzorek			2. Vzorek			3. Vzorek		
Datum				14. 3. 2011					
Prostředí				Vzduch (před degradací)					
Typ plochy	broušen			frézován			odlit		
1. tvrd. [HV]	291			300			298		
2. tvrd. [HV]	290			304			303		
3. tvrd. [HV]	287			296			305		
Tvrd.pr. [HV]	290			300			302		
Hmotnost [g]	153,20			152,80			189,40		
Datum				21. 3. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV]	110	114	109	102	112	88	290	307	312
2. tvrd. [HV]	105	116	104	103	108	92	299	312	303
3. tvrd. [HV]	108	127	107	105	110	90	301	298	307
Tvrd.pr. [HV]	108	119	107	103	110	90	297	306	307
Hmotnost [g]	148,80			149,70			188,60		
Datum				28. 3. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV, HL]	91	99	97	90	285HL	271HL	324	322	317
2. tvrd. [HV, HL]	94	108	96	87	279HL	287HL	296	308	312
3. tvrd. [HV, HL]	87	98	88	91	285HL	302HL	314	302	311
Tvrd.pr. [HV, HL]	91	102	94	89	283HL	286HL	311	311	313
Hmotnost [g]	146,60			147,60			187,70		
Datum				4. 4. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV, HL]	248HL	286HL	116	207HL	211HL	269HL	321	309	326
2. tvrd. [HV, HL]	254HL	270HL	98	209HL	228HL	261HL	308	318	329
3. tvrd. [HV, HL]	260HL	277HL	108	216HL	230HL	283HL	316	324	298
Tvrd.pr. [HV, HL]	254HL	278HL	107	211HL	223HL	271HL	315	317	318
Hmotnost [g]	145,70			146,60			187,70		
Datum				11. 4. 2011					
Prostředí	Voda			Destilovaná voda			Vzduch		
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV, HL]	279HL	240HL	95	210HL	198HL	276HL	317	310	318
2. tvrd. [HV, HL]	266HL	247HL	93	204HL	200HL	270HL	328	319	333
3. tvrd. [HV, HL]	263HL	245HL	101	206HL	203HL	283HL	324	324	328
Tvrd.pr. [HV, HL]	269HL	244HL	96	207HL	200HL	276HL	323	318	326
Hmotnost [g]	144,90			146,20			187,60		
Datum				18. 4. 2011					
Prostředí				Vzduch (vysušení vzorků)					
Typ plochy	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit	broušen	frézován	odlit
1. tvrd. [HV]	166	221	261	170	183	210	320	321	327
2. tvrd. [HV]	182	213	276	166	169	202	329	312	328
3. tvrd. [HV]	174	209	267	165	174	206	325	318	328
Tvrd.pr. [HV]	174	214	268	167	175	206	325	317	328
Hmotnost [g]	133,90			135,60			187,60		

Tab. 3.11.28. Hodnoty naměřené na vzorcích s obsahem kamene 40% v degradačním prostředí.

7.2. Kámen 40% - vytvrzovaný při 20°C po 6 - 7 dní - POVRCH - OKO (FOTO)						
	Povrch před vložením	Dat.	21. 3. 2011	28. 3. 2011	11. 4. 2011	
B R		B R				
		V O D A F R				
		O D				
F R		B R				
		D V O D A F R				
		O D				
O D		B R				
		V Z D U C H F R				
		O D				

Tab. 3.11.29. Povrchy vzorků s obsahem kamene 40% v degradačních prostředích (pohled-foto).

7.3. Kámen 40% - vytvrzovaný při 20°C po 6 - 7 dní - POVRCH - MIKROSKOP (100x)						
	Povrch před vložením	Dat.	21. 3. 2011	28. 3. 2011	11. 4. 2011	
B R		B R				
		V O D A F R				
		O D				
F R		B R				
		D V O D A F R				
		O D				
O D		B R				
		V Z D U C H F R				
		O D				

Tab. 3.11.30. Povrchy vzorků s obsahem kamene 40% v degračních prostředích (pod mikroskopem).



**8.1. Popílek K6-LF 40% - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 - 7 dní**

*Obr. 43. Rozbitý vzorek od obrábění s obsahem popílku K6-LF 40%.*

#### **4. Diskuse a shrnutí výsledků**

Geopolymer je poměrně nový materiál, který by se mohl využít v široké škále odvětví průmyslu. Cílem této bakalářské práce bylo zjistit, jak se chovají různé povrchy geopolymery v odlišných prostředích a zda dochází k jejich změně. Posuzoval jsem vzorky vytvrzované při laboratorní teplotě a při teplotě 60°C.

Odlité povrchy vzorků po vytvrzení (7 dní nebo 24 hodin) se začnou pomalu měnit po dobu minimálně 28 dní, to je doba zrání. Během zrání dochází ke změně barvy na odlitém povrchu vzorku, mění se tvrdost, hustota a nastává smrštění vzorků. Po skončení zrání nedochází ke změně v podobě smrštění. V době zrání vzorků všechny vzorky světlají. Některé po celé odlité ploše, jiné tvoří světlé či tmavé skvrny. Tyto skvrny se časem zvětšují. Zhruba po 3 - 4 týdnech pozorování při zrání se začala barva povrchu opět měnit (světlejší i tmavší skvrny mizí), jako by plocha přecházela do jedné barvy. Ne u všech vzorků se povrch přemění na jednotnou barvu. Většina vzorků zůstává z velké části barevně nehomogenní. Nejvíce se to projevuje na vzorcích s obsahem kamene a lupku, které jsou vytvrzené při laboratorní teplotě a naopak nejmenší změny povrchu při stárnutí jsou vidět u vzorků vytvrzovaných při 60°C. Při pozorování povrchu pod mikroskopem během doby zrání nejsou vidět změny struktury, pouze změny barvy povrchu (místy barevné přechody).

Tvrdost vzorků vytvrzovaných při 60°C je po 7 dnech zrání vyšší než u vytvrzovaných při laboratorní teplotě. Po 2 - 3 týdnech je tvrdost všech vzorků srovnatelná. Nakonec ve 4. - 5. týdnu je tvrdost vzorků vytvrzovaných při laboratorní teplotě vyšší. Vzorky vytvrzované při 60°C dostávají vyšší teplotou "vytvrzovací náskok", tím mají vyšší mechanické vlastnosti.



Vzorky při laboratorní teplotě začínají s mechanickými vlastnostmi od nuly, proto po 7 dnech zrání jsou tvrdosti rozdílné.

Nejvyšší tvrdosti dosahují po zrání (4 - 5 týdnů) kámen, lupek a popílek PRT. Všechny jsou vytvrzované při laboratorní teplotě.

Při zrání se také mění již zmiňovaná hustota a rozměr vzorku (smrštění). Nejmenší hustotu má geopolymerní kompozit s plnivem popílku K6-LF, ale obecně vzato všechny geopolymerní kompozity na bázi popílku jsou lehčí než vzorky s obsahem kamene a lupku.

Podíváme-li se na smrštění (úbytky), tak největší hmotnostní úbytek je u vzorků s popílky a jsou to K6-LF (12,19%), K1 (11,85%) a K6 (9,68%). Naopak největší rozměrové smrštění mají vzorky s obsahem popílku PRT, OPE a kamene. Také zjistíme, že rozměrové smrštění závisí na množství přidané vody a na savosti částic. Více vody znamená větší smrštění. Například popílek K6-LF má velký podíl vody, ale zřejmě díky své savosti nemá takové rozměrové smrštění jako např. vzorky s obsahem kamene, do kterých se voda nepřidává vůbec.

Po skončení zrání vzorků se jejich povrch dal obrobit z každé strany jinou technologií - frézování, broušení a na spodní straně zůstal povrch odlitý. Většině vzorků obrobení povrchu prospělo. Povrch měl prakticky jednotnou barvu, ale u některých vzorků se po obrábění charakter povrchu rapidně zhoršil. Zejména u broušených povrchů vzorků s popílkem OPE, obou lupků a frézovaný povrch s vytvrzovaným kamenem při 60°C. Mohl to být důsledek nevhodně volených řezných podmínek. Obrábění těchto materiálů je také v počáteční fázi.

Následně byly vzorky rozřezány na menší kusy, které se daly do odlišných degradačních prostředí (voda, destilovaná voda a vzduch).

Před vložením vzorků do kádinek jsem změřil tvrdost daných povrchů a zjistil jsem s porovnáním odlitého povrchu, že všem obrobeným povrchům u vzorků s obsahem kamene a lupku vytvrzovaných při 60°C klesla tvrdost, u popílku K6 se tvrdosti zvýšily. U vzorků vytvrzovaných při laboratorní teplotě se tvrdost po obrobení zmenšila, byly to vzorky s obsahem popílku K1, K3 a K6. Tvrdosti u ostatních vzorků byly stejné nebo naopak vyšší.

Charakter povrchu po frézování byl skoro stejný jako po broušení. Rozdíl v drsnosti povrchu byl malý, přesto byl patrný.

V prostředí na vzduchu dochází k dozrávání vzorků, což má za následek zvyšování tvrdosti u všech vzorků a mírně se sníží hmotnost (hustota). U popílku K6, vytvrzovaném při 60°C, se naopak tvrdost zmenšila a pak nepatrně narůstala.

U vzorků umístěných ve vodě nebo v destilované vodě po týdnu dochází k rapidnímu poklesu tvrdosti všech druhů ploch a následný týden už pokles není tak velký. Ale tvrdost stále klesá až pod stupnici tvrdosti Vickerse. Z těchto důvodů měříme ve stupnici Leeba. Naopak hmotnost vzorků se zvýšila v 1. týdnu a v následujících týdnech mírně klesala (důsledek vylučování bílé sraženiny ve vodách). Z toho vyplývá, že geopolymery jsou mírně nasákavé.

Na měřených plochách zůstávají znatelné stopy po měření tvrdosti (důsledek rapidního snížení tvrdosti). Povrchy ve vodě a destilované vodě se stávají na dotek mnohem hrubší než před vložením do nádob s tekutinou. Skvrny na pozorovaných plochách částečně zmizely (dostaly jednotnou barvu). Ani pod optickým mikroskopem není vidět změna struktury, ale pouze se více zviditelňují stopy po obrábění nebo po poškrábání.

Toto na vzorcích na vzduchu není vůbec patrné i povrch zůstává na dotek stejný jako na začátku pozorování, dokonce ani barva (skvrny) se nemění.

Ze všech druhů vzorků se ve vodě a destilované vodě vylučovala bílá sraženina. Podobu měla u každého vzorku různou, byly to nejčastěji usazeniny na dně nebo byla zcela rozpuštěná a voda měla zbarvení do běla. Usazeniny se nejvíce vyskytovaly v destilované vodě. Rozpuštěná bílá sraženina se nejčastěji vyskytovala ve vodě. Největší množství se vylučovalo ze vzorků vytvrzovaných při laboratorní teplotě s obsahem kamene, popílku K1, K3 a PRT.



Obr. 44. Podoba vyloučené bílé sraženiny po vyschnutí kapaliny.

Bílá sraženina se především skládala z:

	Základní prvky (všechny vzorky stejné)					Další prvky	
Prvek	O	K	P	C	Si	Zr	-
Obsah	5 % - 60 %	25 % - 30 %	6 % - 12 %	3 % - 7 %	1 % - 3 %	do 1 %	-

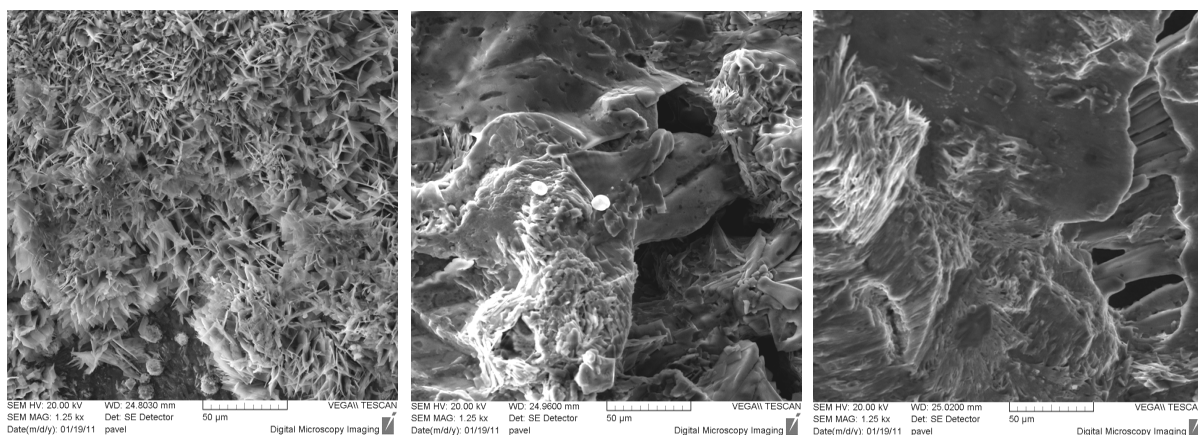
Tab. 4.1. Chemické složení vyloučené bílé sraženiny.

Všechny prvky obsažené v tabulce nalezneme v plnivě nebo v geopolyměru, kromě jednoho. Jedná se o C (uhlík), ten není obsažen v ničem. Jako jedna možnost se jeví, že se C navázal na bílou sraženinu během vysoušení odebraných vzorků kapalin, v nichž byly vzorky ponořené. Hlavně jsem nenašel v kapalinách stopy po arsenu, který obsahují popílky.

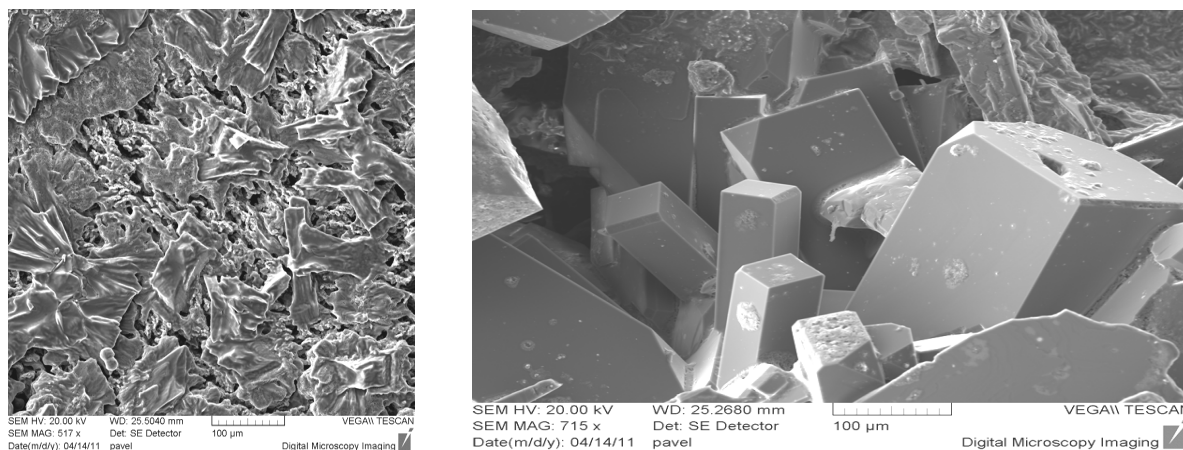
Vyloučená bílá sraženina měla z každého vzorku i prostředí odlišnou podobu i strukturu vyloučení.

Po uplynutí doby 5 - 6 týdnů jsem vzorky vyndal z kádinek a nechal schnout týden na vzduchu i se vzorky degradujícími celou dobu na vzduchu. Následně jsem změřil tvrdosti na povrchu všech vzorků a zjistil jsem, že rapidně stouply. Největší nárůst tvrdosti měly vzorky s obsahem kamene a lupku, oba byly vytvrzované při laboratorní teplotě a oba byly ve vodě. Přesto tvrdost nedosahovala takových hodnot jako na začátku. Vzorky v destilované vodě nemají návratnost tvrdosti tak velkou. Konečná hmotnost oproti původní hmotnosti (1.měření) vzorků se dost snížila, a to o 6 až 20 gramů (3 až 15%). Byl to důsledek toho, že se vyloučila bílá sraženina, a že jsou geopolymery částečně nasákavé a vysychavé.

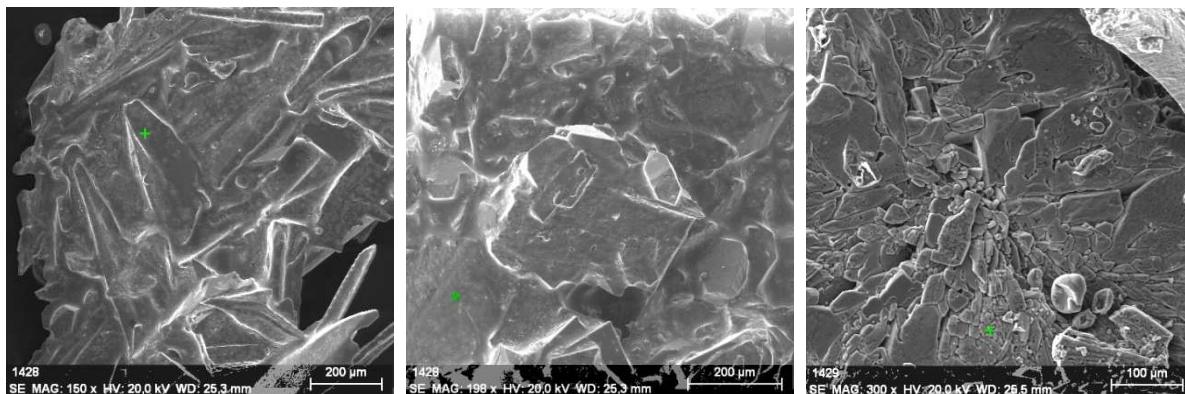
Vzorky, které byly ve vodě nebo destilované vodě mají obrobené i odlité plochy výrazně hrubší než měly před vložením do kádinek (ty měly hladký povrch), barva většiny povrchů se po vysušení změnila na výrazně světlejší odstín v porovnání s původní barvou viz. *příloha 8.3.Barva povrchů po vysušení*. Vzorky na vzduchu měly stálou barvu povrchu jako po zrání.



Obr. 45. Podoby vyloučené bílé sraženiny v destilované vodě ze vzorků vytvrzovaných při 60°C s obsahem popílku K6 (vlevo), kamene (uprostřed), lupku (vpravo).



Obr. 46. Podoby vyloučené bílé sraženiny v destilované vodě ze vzorků vytvrzovaných při laboratorní teplotě s obsahem popílku K6 (vlevo), kamene (vpravo).



Obr. 47. Podoby vyloučené bílé sraženiny v destilované vodě ze vzorků vytvrzovaných při laboratorní teplotě s obsahem lupku (vlevo), popílkou K3 (uprostřed), popílkou PRT (vpravo).

## 5. Závěr

Zhodnotíme-li všechny naměřené výsledky, zjistíme, že nejlepší parametry vykazují vzorky, které jsou vytvrzované při 60°C po 24 hodin a to hlavně s obsahem lupku a kamenu. Smrštění mají oba druhy geopolymerního kompozitu velmi malé oproti stejným vzorkům vytvrzovaných při laboratorní teplotě. Mají vysokou tvrdost všech povrchů, která na vzduchu vzroste až na 250-300 HV. Nejtvrdší bývá odlitý povrch, tvrdosti frézovaných a broušených povrchů jsou stejné, ale jejich tvrdost je nepatrně menší než u odlitého povrchu. Vzorky po vytvrzování jsou barevně homogenní a během doby zrání nedochází k tvorbě skvrn v takové velké míře jako u vzorků vytvrzovaných při laboratorní teplotě. Nevýhodou těchto dvou geopolymerních kompozitů je vyšší hmotnost (vyšší hustota) a vyšší cena z důvodů nutnosti vytvrzování za vyšší teploty oproti ostatním.

Vzorky s obsahem lupku dobře odolávaly vodě i destilované vodě. Tvrdost těchto povrchů neklesla pod stupnici tvrdosti Vickerse. Dokonce ve 4. týdnu jeho tvrdost ve vodě a destilované vodě stoupla a pak následný týden byla jeho tvrdost stálá. Vzorek s obsahem lupku má na vzduchu mírně barevně nehomogenní broušený i frézovaný povrch, ale odlitý je pokryt velkými skvrnami.

Vzorek s obsahem kamene měl také dobrou odolnost proti vodě a destilované vodě, ale pouze broušený a frézovaný povrch. Odlitý povrch velice změkkl. Na vzduchu je broušený a odlitý povrch bez skvrn, na frézovaném jsou vidět výrazné barevné přechody.

Povrchy u obou vzorků ve vodě a destilované vodě mají jednu barvu a po vysušení se barva povrchů změnila na mnohem světlejší odstín jejich původní barvy (skoro až bílá).

Za zmínku stojí ještě vzorek s obsahem popílkou K6 vytvrzovaný při laboratorní teplotě, který má větší tvrdost než stejný vzorek vytvrzovaný při 60°C (velký rozdíl). To je způsobeno



tím, že během roku došlo k nákupu nové dávky, a ta byla v mnohem hrubší podobě než původní K6 (vytvrzovaný při 60°C). Dobře odolával každému prostředí a na vzduchu dosahoval vysokých tvrdostí až v průměru ke 280 HV. Má nízkou hustotu. Broušený povrch má malé skvrny, frézovaný a odlitý povrch jsou bez výrazných skvrn, ale v kapalinách mají jednotnou barvu povrchu. V prvním týdnu pozorování však vzorek ve vodě praskl. Po vysušení změnil barvu na světlejší. Další dobré povrchy mají vzorky s obsahem kamene a lupku, oba vytvrzované při laboratorní teplotě, a to hlavně frézované a odlité povrchy, které jsou bez skvrn. Mají špatnou odolnost vůči kapalinám, ale zato mají velkou návratnost tvrdostí povrchů.

Destilovaná voda měla na geopolymerní kompozity mnohem větší vliv, než běžná voda. Tvrdosti povrchů v ní klesaly rychleji a po vysušení se tvrdost tolik nevracela.

Hmotnost vzorků po degradaci ve vodě, destilované vodě a po následném vysušení klesla o 3 až 15% z původní hmotnosti, která byla naměřena před vložením do kádinek.

Dále by bylo potřeba zjistit, jak se budou chovat vzorky vytvrzované při vyšších a nižších teplotách. Vyzkoušet jiné druhy geopolymery a další jiná možná plniva. Potřeba je také vyzkoušet více degradačních prostředí a zjistit, které geopolymerním kompozitům nevadí.

Navrhoval bych povrch stabilizovat, aby nedocházelo k nechtěnému vzniku skvrn na povrchu. Jako první možnost se jeví potahování povrchu geopolymery např.: bezbarvým lakem, vodním sklem atd. K potažení musí dojít hned po vytvrzování, než dojde ke stárnutí, kde se povrch mění nejvíce (hlavní stádium změny barvy povrchů).

Někdy je řešením obrobení povrchu geopolymerního kompozitu (u některých vzorků jsou skvrny jen na povrchu nebo do nepatrné hloubky), ale musí k tomu dojít po době zrání, jinak má obrobený povrch znovu tendenci tvořit skvrny nebo měnit barvu.

Užití dosavadních geopolymerních kompozitů je dosti široké a tato oblast se bude s přibývajícím časem určitě rozšiřovat. Doporučil bych užívat geopolymery na vzdušném prostředí, třeba i s mírnou vlhkostí, ale určitě bych je nedoporučoval do dlouhodobého kontaktu s vodou a jinými kapalinami. Další problém je z hlediska estetiky. Kde nevadí skvrny různých odstínů, tak jejich užití nic nebrání. Jinak je nutno geopolymer natřít nátěrem, který tyto skvrny zakryje.

Také by se měla zkusit užívat přesnější metoda analýzy prvků WDX, vedoucí k přesnějšímu složení např. bílé vyloučené sraženiny.

V *Příloze 8.1.* jsou přiloženy grafy s průběhy tvrdostí a hmotností všech vzorků dále v *Příloze 8.2.* je zrání čistého geopolymery (lepidla FC-1).

## 6. Seznam obrázků a tabulek

### Obrázky:

- Obr. 1. Typy polysialátů a schéma molekulární struktury [1].
- Obr. 2. Zesíťované řetězce geopolymery [4].
- Obr. 3. Zobrazení molekulární struktury hlinitokřemičitanů užívaných jako prekurzor v procesu geopolymerizace [1].
- Obr. 4. Přehled geopolymerních kompozitů [1].
- Obr. 5. Ohni-odolný dřevo-geopolymerový panel (struktura) [1, 6].
- Obr. 6. Ohni-odolný dřevo-geopolymerní panel [6].
- Obr. 7. Francouzské stíhací letadlo Rafale [1, 6].
- Obr. 8. Kompozit uhlíko-epoxidový (vlevo) hoří, zatímco kompozit uhlíkovo-geopolymerní (vpravo) stále udržuje teplotu 1200°C [1, 6].
- Obr. 9. Závodní vůz "The Eagle" jezdící v americké závodní lize C.A.R.T. v roce 1999 [1, 6].
- Obr. 10. Betonový nosník s uloženou vrstvou geopolymerního kompozitu na povrchu před pevnostní zkouškou [1, 6].
- Obr. 11. Uskladnění geopolymery.
- Obr. 12. Druhy použitých plniv.
- Obr. 13. Malá válcová forma.
- Obr. 14. Středně velká válcová forma: Ø31 x 51 mm (vlevo) a Ø30 x 24,5 mm (vpravo).
- Obr. 15. Velká kvádrová forma.
- Obr. 16. Postup míchání geopolymerní hmoty.
- Obr. 17. Postup odlití geopolymerní hmoty do formy.
- Obr. 18. Vibrační zařízení.
- Obr. 19. Pec na vytvrzování geopolymerní hmoty.
- Obr. 20. Zrání a měření geopolymerního kompozitu.
- Obr. 21. Elektrická flexa DELTA ABRASIMET CUTTER.
- Obr. 22. SEM a EDX pohled na povrch geopolymerního kompozitu s obsahem kamene 40% (60°C).
- Obr. 23. SEM a EDX pohled na povrch geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K6 40% (60°C).
- Obr. 24. SEM a EDX pohled na povrch geopolymerního kompozitu s obsahem lupku 40% (60°C).
- Obr. 25. SEM a EDX pohled na povrch geopolymerního kompozitu s obsahem popílku OPE 40%.
- Obr. 26. SEM a EDX pohled na povrch geopolymerního kompozitu s obsahem popílku PRT 40%.
- Obr. 27. SEM a EDX pohled na povrch geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K1 40%.
- Obr. 28. SEM a EDX pohled na povrch geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K3 40%.
- Obr. 29. SEM a EDX pohled na povrch geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K6 40%.
- Obr. 30. SEM a EDX pohled na povrch geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K6-LF 40%.

- Obr. 31. SEM a EDX pohled na povrch geopolymerního kompozitu s obsahem lupku 40%.  
Obr. 32. SEM a EDX pohled na povrch geopolymerního kompozitu s obsahem kamene 40%.  
Obr. 33. Digitální posuvné měřítko PROMA.  
Obr. 34. Měření rozměrů vzorků.  
Obr. 35. Digitální laboratorní váhy DENVER INSTRUMENT XP-3000.  
Obr. 36. Digitální tvrdoměr MH-180 (Leeb tester).  
Obr. 37. Princip dynamické metody měření tvrdosti [8].  
Obr. 38. Měření povrchu sondou (vlevo), průřez měřící sondou (vpravo) [7, 8].  
Obr. 39. Části digitálního tvrdoměru MH-180 (Leeb tester) [7].  
Obr. 40. Pozorování povrchů na optickém mikroskopu NIKON EPIPHOT 200.  
Obr. 41. Injekční stříkačka používaná na odběry (vlevo), kádinky se vzorky (vpravo).  
Obr. 42. Rozbitý vzorek od obrábění s obsahem popílku OPE 40%.  
Obr. 43. Rozbitý vzorek od obrábění s obsahem popílku K6-LF 40%.  
Obr. 44. Podoba vyloučené bílé sraženiny po vyschnutí kapaliny.  
Obr. 45. Podoby vyloučené bílé sraženiny v destilované vodě ze vzorků vytvrzovaných při 60°C, popílek K6 (vlevo), kámen (uprostřed), lupek (vpravo).  
Obr. 46. Podoby vyloučené bílé sraženiny v destilované vodě ze vzorků vytvrzovaných při laboratorní teplotě, popílek K6 (vlevo), kámen (vpravo).  
Obr. 47. Podoby vyloučené bílé sraženiny v destilované vodě ze vzorků vytvrzovaných při laboratorní teplotě, lupek (vlevo), popílek K3 (uprostřed), popílek PRT (vpravo).  
Obr. 48. Povrchy vzorků po vysušení, vzorky jsou vytvrzované při 60°C po 24 hodin.  
Obr. 49. Povrchy vzorků po vysušení, vzorky jsou vytvrzované při laboratorní teplotě po 7 dní.

### **Tabulky:**

- Tab. 1.1. Základní obecné vlastnosti geopolymerů [1].  
Tab. 3.4.1. Hmotnostní podíly jednotlivých prvků v geopolymerním kompozitu s obsahem kamene 40% (60°C).  
Tab. 3.4.2. Hmotnostní podíly jednotlivých prvků v geopolymerním kompozitu s obsahem popílku K6 40% (60°C).  
Tab. 3.4.3. Hmotnostní podíly jednotlivých prvků v geopolymerním kompozitu s obsahem lupku 40% (60°C).  
Tab. 3.4.4. Hmotnostní podíly jednotlivých prvků v geopolymerním kompozitu s obsahem popílku OPE 40%.  
Tab. 3.4.5. Hmotnostní podíly jednotlivých prvků v geopolymerním kompozitu s obsahem popílku PRT 40%.  
Tab. 3.4.6. Hmotnostní podíly jednotlivých prvků v geopolymerním kompozitu s obsahem popílku K1 40%.  
Tab. 3.4.7. Hmotnostní podíly jednotlivých prvků v geopolymerním kompozitu s obsahem popílku K3 40%.  
Tab. 3.4.8. Hmotnostní podíly jednotlivých prvků v geopolymerním kompozitu s obsahem popílku K6 40%.  
Tab. 3.4.9. Hmotnostní podíly jednotlivých prvků v geopolymerním kompozitu s obsahem popílku K6-LF 40%.

- Tab. 3.4.10. Hmotnostní podíly jednotlivých prvků v geopolymerním kompozitu s obsahem lupku 40%.
- Tab. 3.4.11. Hmotnostní podíly jednotlivých prvků v geopolymerním kompozitu s obsahem kamene 40%.
- Tab. 3.7.1. Typy a užití jednotlivých sond Leebova tvrdoměru [7].
- Tab. 3.10.1. Hodnoty naměřené na vzorku (nahore) + snímky odlitého povrchu z mikroskopu a pohled okem po dobu zrání geopolymerního kompozitu s obsahem kamene 40% (60°C).
- Tab. 3.10.2. Hodnoty naměřené na vzorku (nahore) + snímky odlitého povrchu z mikroskopu a pohled okem po dobu zrání geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K6 40% (60°C).
- Tab. 3.10.3. Hodnoty naměřené na vzorku (nahore) + snímky odlitého povrchu z mikroskopu a pohled okem po dobu zrání geopolymerního kompozitu s obsahem lupku 40% (60°C).
- Tab. 3.10.4. Hodnoty naměřené na vzorku (nahore) + snímky odlitého povrchu z mikroskopu a pohled okem po dobu zrání geopolymerního kompozitu s obsahem popílku OPE 40%.
- Tab. 3.10.5. Hodnoty naměřené na vzorku (nahore) + snímky odlitého povrchu z mikroskopu a pohled okem po dobu zrání geopolymerního kompozitu s obsahem popílku PRT 40%.
- Tab. 3.10.6. Hodnoty naměřené na vzorku (nahore) + snímky odlitého povrchu z mikroskopu a pohled okem po dobu zrání geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K1 40%.
- Tab. 3.10.7. Hodnoty naměřené na vzorku (nahore) + snímky odlitého povrchu z mikroskopu a pohled okem po dobu zrání geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K3 40%.
- Tab. 3.10.8. Hodnoty naměřené na vzorku (nahore) + snímky odlitého povrchu z mikroskopu a pohled okem po dobu zrání geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K6 40%.
- Tab. 3.10.9. Hodnoty naměřené na vzorku (nahore) + snímky odlitého povrchu z mikroskopu a pohled okem po dobu zrání geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K6-LF 40%.
- Tab. 3.10.10. Hodnoty naměřené na vzorku (nahore) + snímky odlitého povrchu z mikroskopu a pohled okem po dobu zrání geopolymerního kompozitu s obsahem lupku 40%.
- Tab. 3.10.11. Hodnoty naměřené na vzorku (nahore) + snímky odlitého povrchu z mikroskopu a pohled okem po dobu zrání geopolymerního kompozitu s obsahem kamene 40%.
- Tab. 3.11.1. Hodnoty naměřené na vzorcích s obsahem kamene 40% (60°C) v degradačním prostředí.
- Tab. 3.11.2. Povrchy vzorků s obsahem kamene 40% (60°C) v degradačních prostředích (pohled-foto).
- Tab. 3.11.3. Povrchy vzorků s obsahem kamene 40% (60°C) v degradačních prostředích (pod mikroskopem).
- Tab. 3.11.4. Hodnoty naměřené na vzorcích s obsahem popílku K6 40% (60°C)



*v degračním prostředí.*

*Tab. 3.11.5. Povrchy vzorků s obsahem popílku K6 40% (60°C) v degračních prostředích (pohled-foto).*

*Tab. 3.11.6. Povrchy vzorků s obsahem popílku K6 40% (60°C) v degračních prostředích (pod mikroskopem).*

*Tab. 3.11.7. Hodnoty naměřené na vzorcích s obsahem lupku 40% (60°C) v degračním prostředí.*

*Tab. 3.11.8. Povrchy vzorků s obsahem lupku 40% (60°C) v degračních prostředích (pohled-foto).*

*Tab. 3.11.9. Povrchy vzorků s obsahem lupku 40% (60°C) v degračních prostředích (pod mikroskopem).*

*Tab. 3.11.10. Hodnoty naměřené na vzorcích s obsahem popílku OPE 40% v degračním prostředí.*

*Tab. 3.11.11. Povrchy vzorku s obsahem popílku OPE 40% v degračních prostředích (pohled-foto).*

*Tab. 3.11.12. Povrchy vzorku s obsahem popílku OPE 40% v degračních prostředích (pod mikroskopem).*

*Tab. 3.11.13. Hodnoty naměřené na vzorcích s obsahem popílku PRT 40% v degračním prostředí.*

*Tab. 3.11.14. Povrchy vzorků s obsahem popílku PRT 40% v degračních prostředích (pohled-foto).*

*Tab. 3.11.15. Povrchy vzorků s obsahem popílku PRT 40% v degračních prostředích (pod mikroskopem).*

*Tab. 3.11.16. Hodnoty naměřené na vzorcích s obsahem popílku K1 40% v degračním prostředí.*

*Tab. 3.11.17. Povrchy vzorků s obsahem popílku K1 40% v degračních prostředích (pohled-foto).*

*Tab. 3.11.18. Povrchy vzorků s obsahem popílku K1 40% v degračních prostředích (pod mikroskopem).*

*Tab. 3.11.19. Hodnoty naměřené na vzorcích s obsahem popílku K3 40% v degračním prostředí.*

*Tab. 3.11.20. Povrchy vzorků s obsahem popílku K3 40% v degračních prostředích (pohled-foto).*

*Tab. 3.11.21. Povrchy vzorků s obsahem popílku K3 40% v degračních prostředích (pod mikroskopem).*

*Tab. 3.11.22. Hodnoty naměřené na vzorcích s obsahem popílku K6 40% v degračním prostředí.*

*Tab. 3.11.23. Povrchy vzorků s obsahem popílku K6 40% v degračních prostředích (pohled-foto).*

*Tab. 3.11.24. Povrchy vzorků s obsahem popílku K6 40% v degračních prostředích (pod mikroskopem).*

*Tab. 3.11.25. Hodnoty naměřené na vzorcích s obsahem lupku 40% v degračním prostředí.*

*Tab. 3.11.26. Povrchy vzorků s obsahem lupku 40% v degračních prostředích (pohled-foto).*

*Tab. 3.11.27. Povrchy vzorků s obsahem lupku 40% v degračních prostředích (pod mikroskopem).*

*Tab. 3.11.28. Hodnoty naměřené na vzorcích s obsahem kamene 40% v degračním*

*prostředí.*

*Tab. 3.11.29. Povrchy vzorků s obsahem kamene 40% v degradačních prostředích (pohled-foto).*

*Tab. 3.11.30. Povrchy vzorků s obsahem kamene 40% v degradačních prostředích (pod mikroskopem).*

*Tab. 8.2.1. Snímky odlitého povrchu z mikroskopu a pohled okem po dobu zrání lepidla FC-1.*

*Tab. 8.2.2. Chemické složení FC-1.*

### **Grafy:**

*Graf. 1. Energetické spektrum EDX prvků geopolymerního kompozitu s obsahem kamene 40% (60°C).*

*Graf. 2. Energetické spektrum EDX prvků geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K6 40% (60°C).*

*Graf. 3. Energetické spektrum EDX prvků geopolymerního kompozitu s obsahem lupku 40% (60°C).*

*Graf. 4. Energetické spektrum EDX prvků geopolymerního kompozitu s obsahem popílku OPE 40%.*

*Graf. 5. Energetické spektrum EDX prvků geopolymerního kompozitu s obsahem popílku PRT 40%.*

*Graf. 6. Energetické spektrum EDX prvků geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K140%.*

*Graf. 7. Energetické spektrum EDX prvků geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K3 40%.*

*Graf. 8. Energetické spektrum EDX prvků geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K6 40%.*

*Graf. 9. Energetické spektrum EDX prvků geopolymerního kompozitu s obsahem popílku K6-LF 40%.*

*Graf. 10. Energetické spektrum EDX prvků geopolymerního kompozitu s obsahem lupku 40%.*

*Graf. 11. Energetické spektrum EDX prvků geopolymerního kompozitu s obsahem kamene 40%.*

### **Rovnice:**

*Rov. 1. Chemické reakce probíhající během vzniku polysialátů [1, 2].*

*Rov. 2. Chemické reakce probíhající během vzniku poly(siloxo-sialátů) [1, 2].*

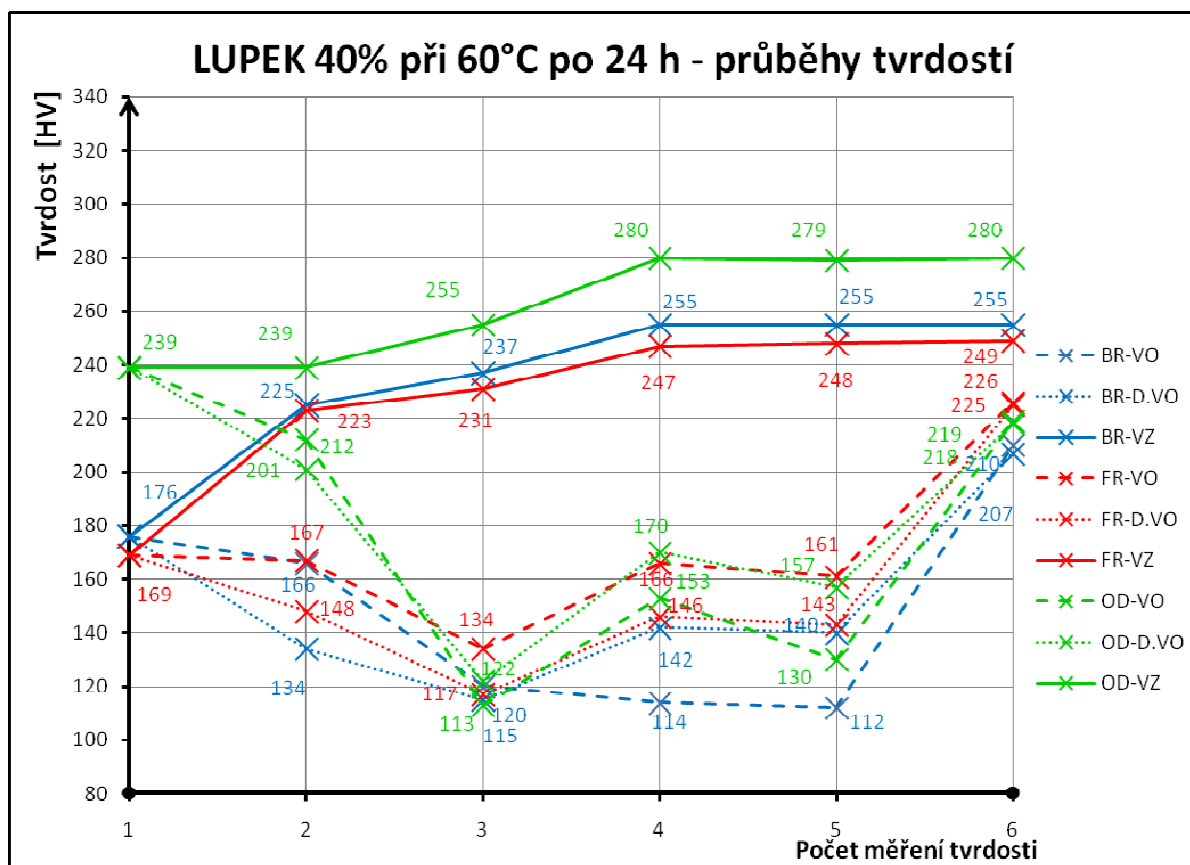
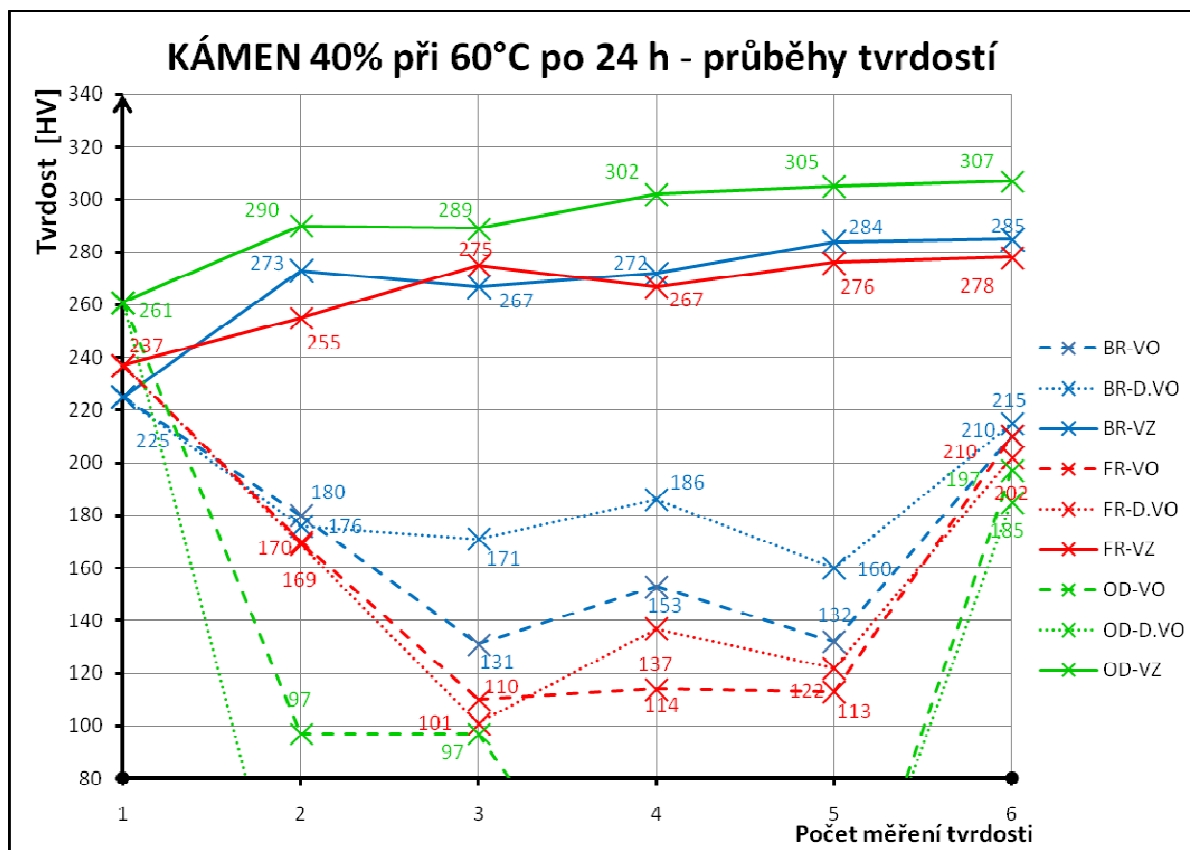
## **7. Použitá literatura**

- [1] JASZICEK, M. Hodnocení fyzikálních vlastností kompozitních systémů s geopolymerní maticí. Diplomová práce TUL, 2009.
- [2] DAVIDOVITS, J. Geopolymer of Chemistry and Properties. Geopolymer '88, Vol.1, pp. 25-48
- [3] URL < <http://cs.wikipedia.org/wiki/Geopolymer> > online [13. 4. 2011]
- [4] Joseph Davidovits. Chemistry of geopolymeric systems, terminology, Géopolymère'99 Proceedings, pp. 9-40
- [5] Karel Daďourek. Kompozitní materiály - druhy a jejich užití. TUL 2007
- [6] Joseph Davidovits. 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs. Geopolymer 2002 Conference, October 28-29, 2002, Melbourne, Australia
- [7] URL < [http://www.mltest.com/PDF/mh180\\_manual.pdf](http://www.mltest.com/PDF/mh180_manual.pdf) > online [18. 4. 2011] ( MH180 Leeb Hardness Tester User's Manual Mitech Inc. Ltd. )
- [8] URL< <http://www.defektoskopie.com/testima/prilohy/157/tvrdostzprava.pdf> > online [18. 4. 2011] (Měření tvrdosti přesnými tvrdoměry - Aplikační zpráva), Testima
- [9] N. T. XIEM, P. LOUDA, D. KROISOVÁ, D. BORTNOVSKY, Effects of high Temperature on the mechanical properties of fly ash and stone powder based geopolymer materials, 18<sup>th</sup> International Students Day of Metallurgy, Leoben, Austria, ISBN: 978 – 3 – 200 – 02155 – 6

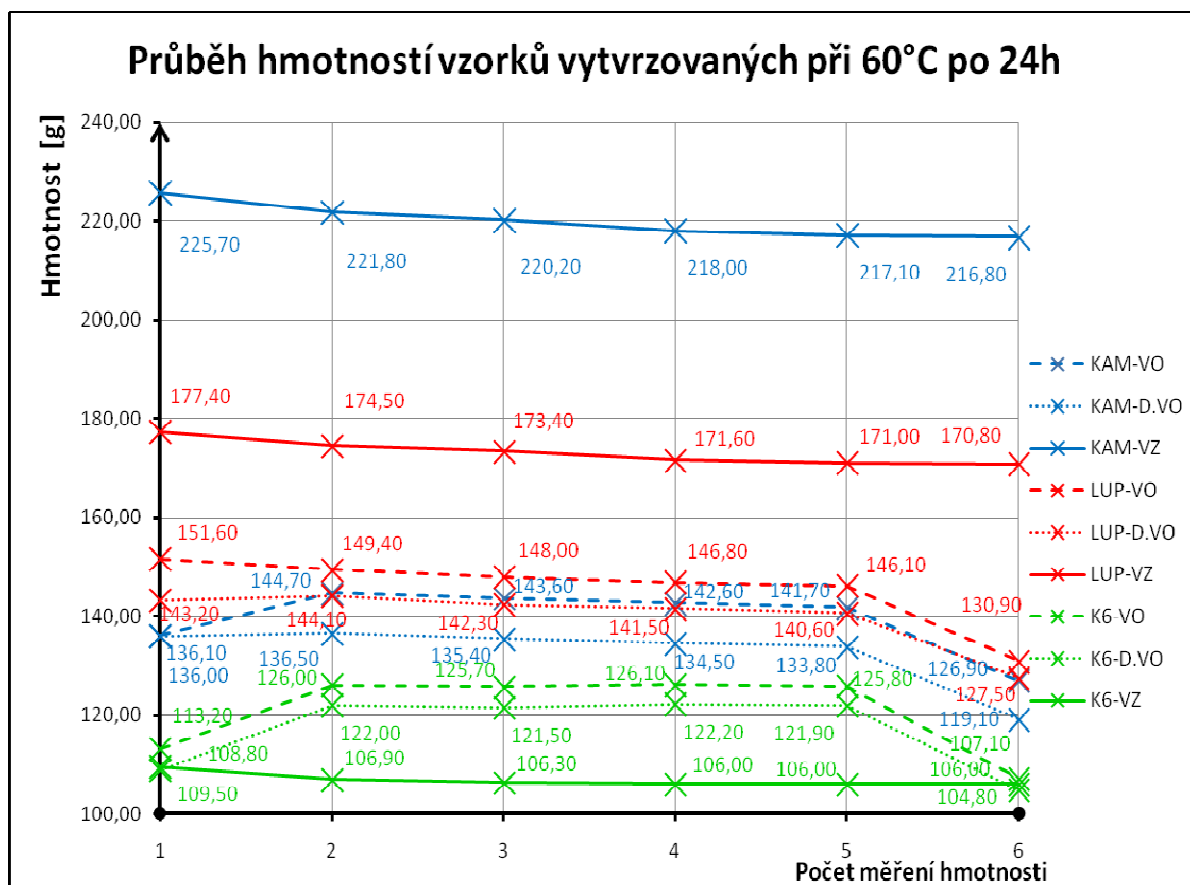
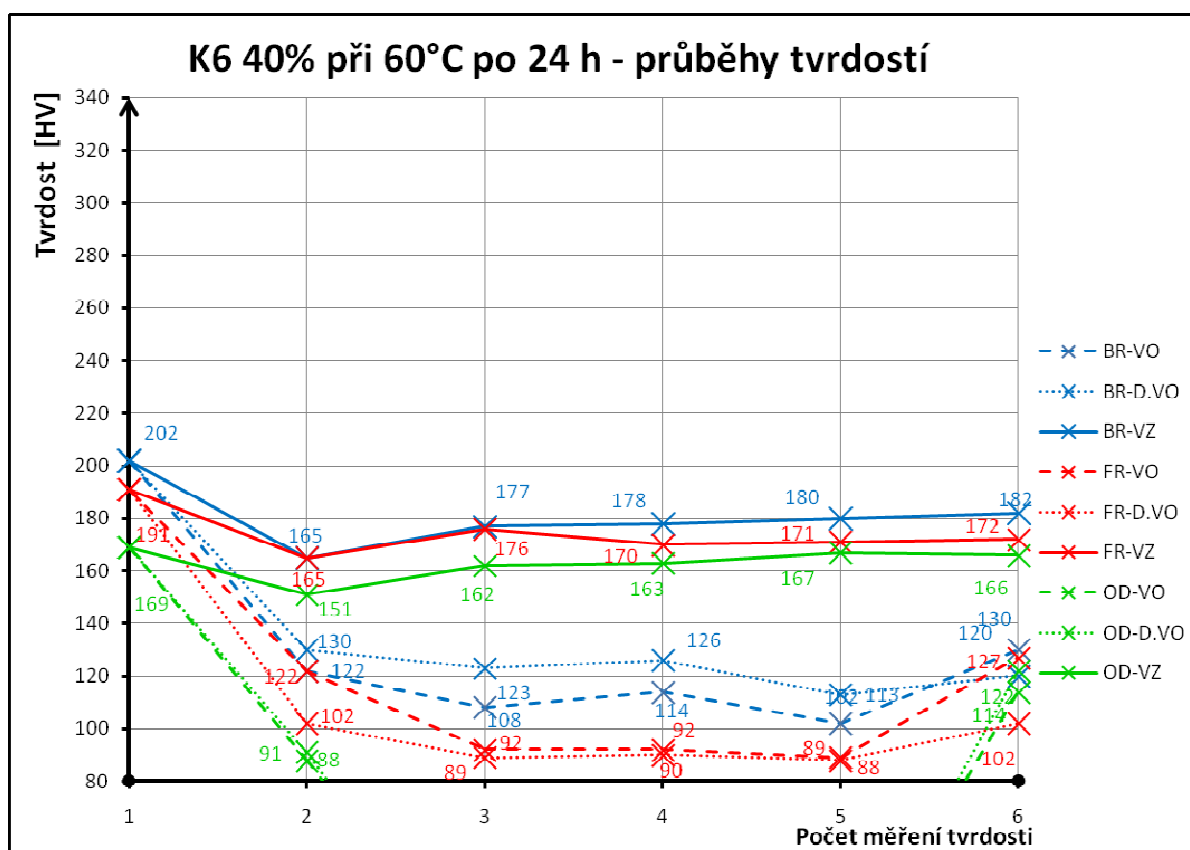
## **8. Přílohy**

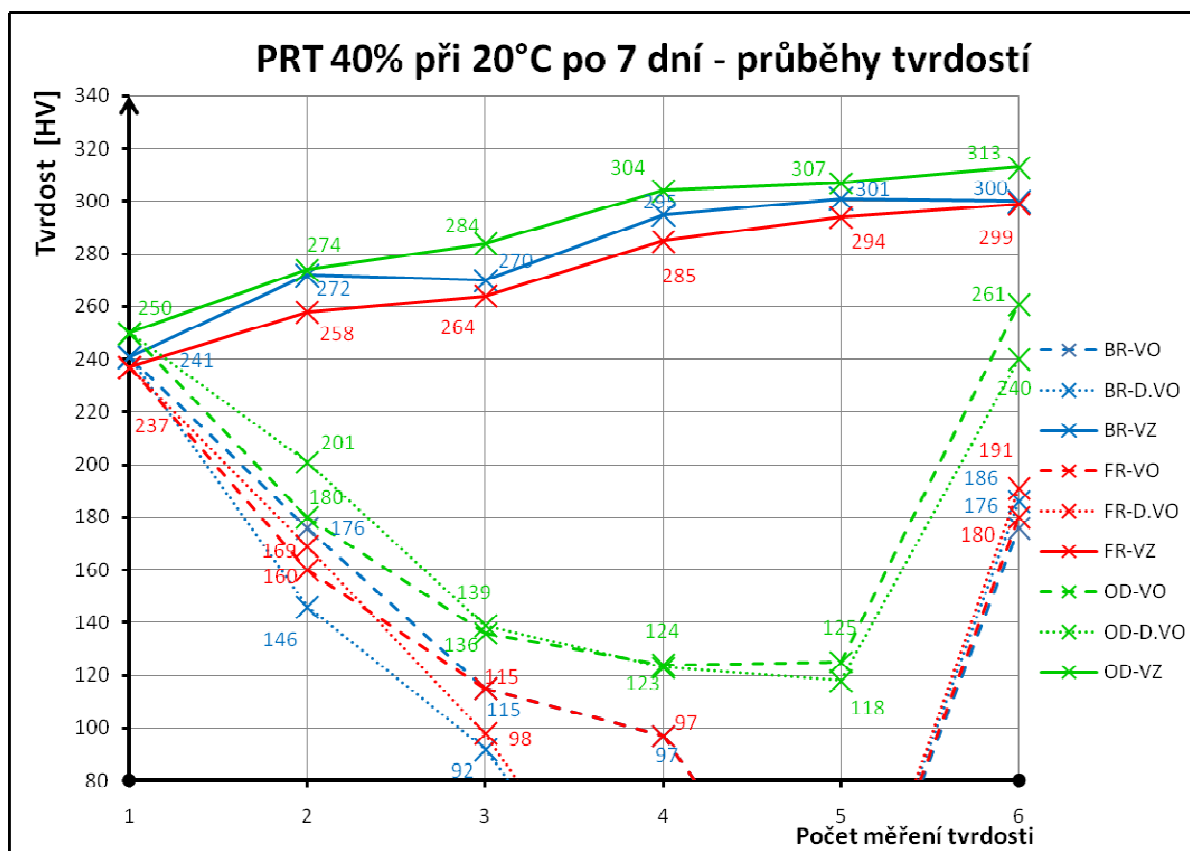
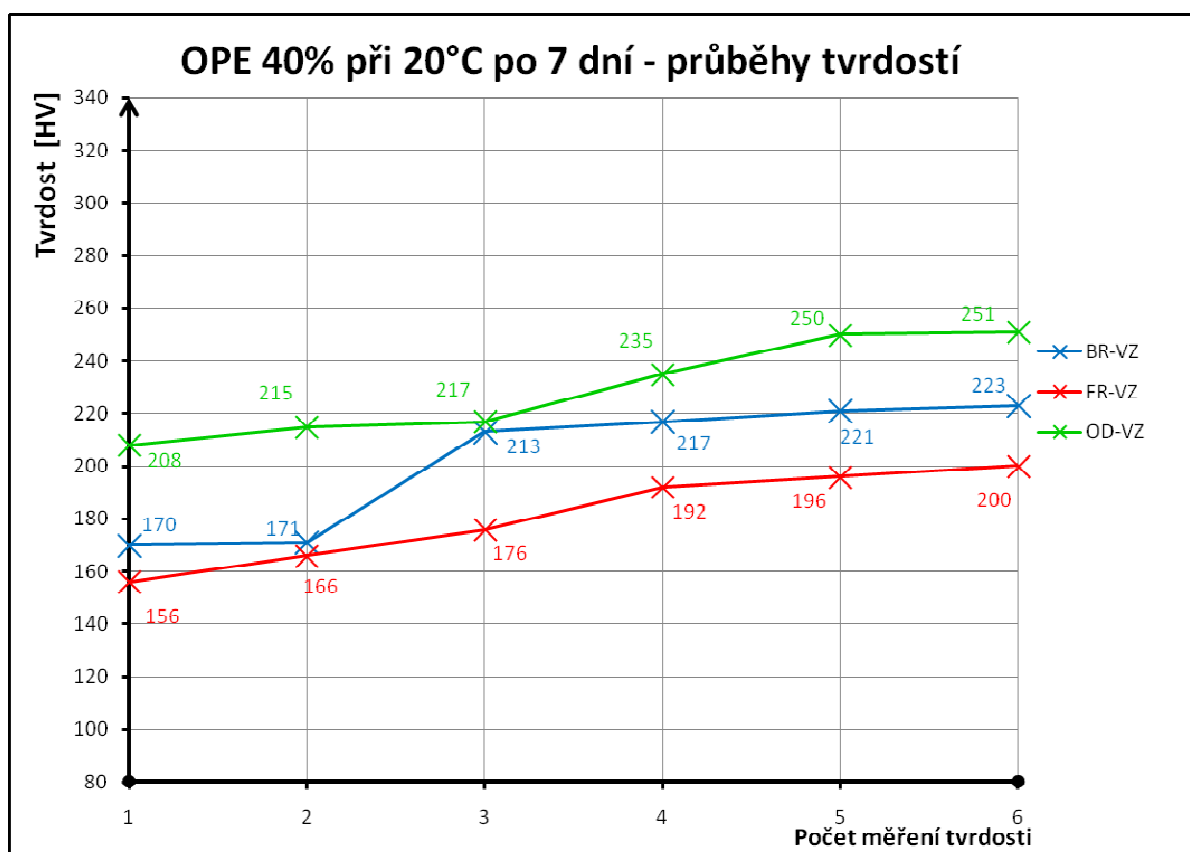
Zde jsou uvedeny všechny dodatečné obrázky, grafy a tabulky k výsledkům této práce.

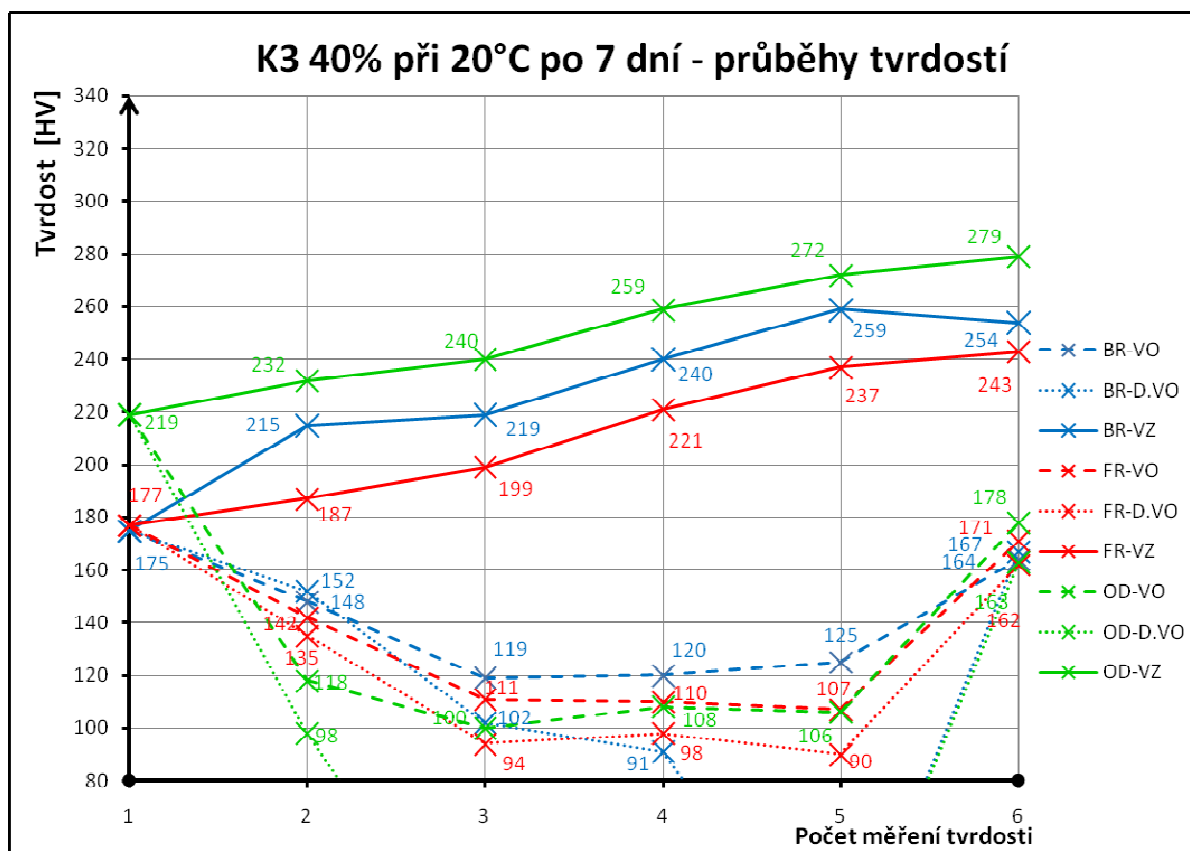
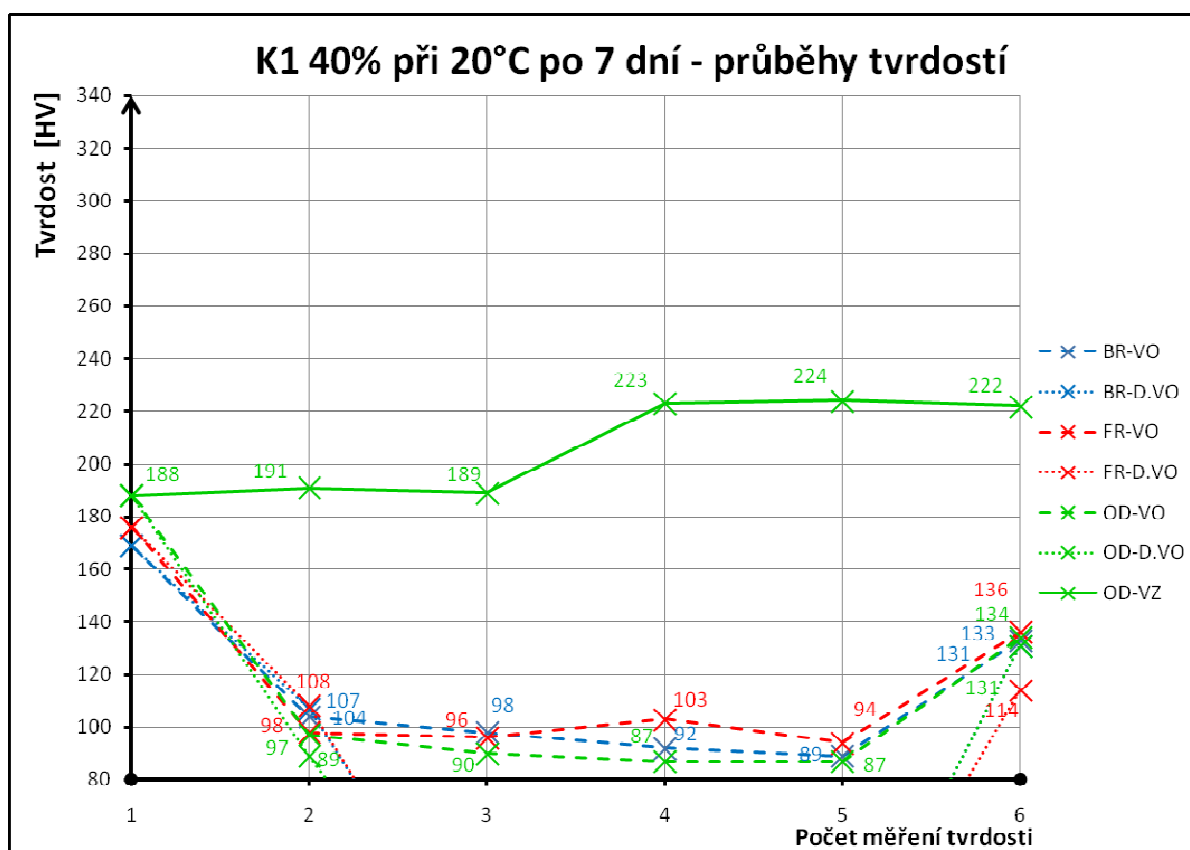
## 8.1. Grafy s průběhy tvrdostí povrchů v odlišných prostředích

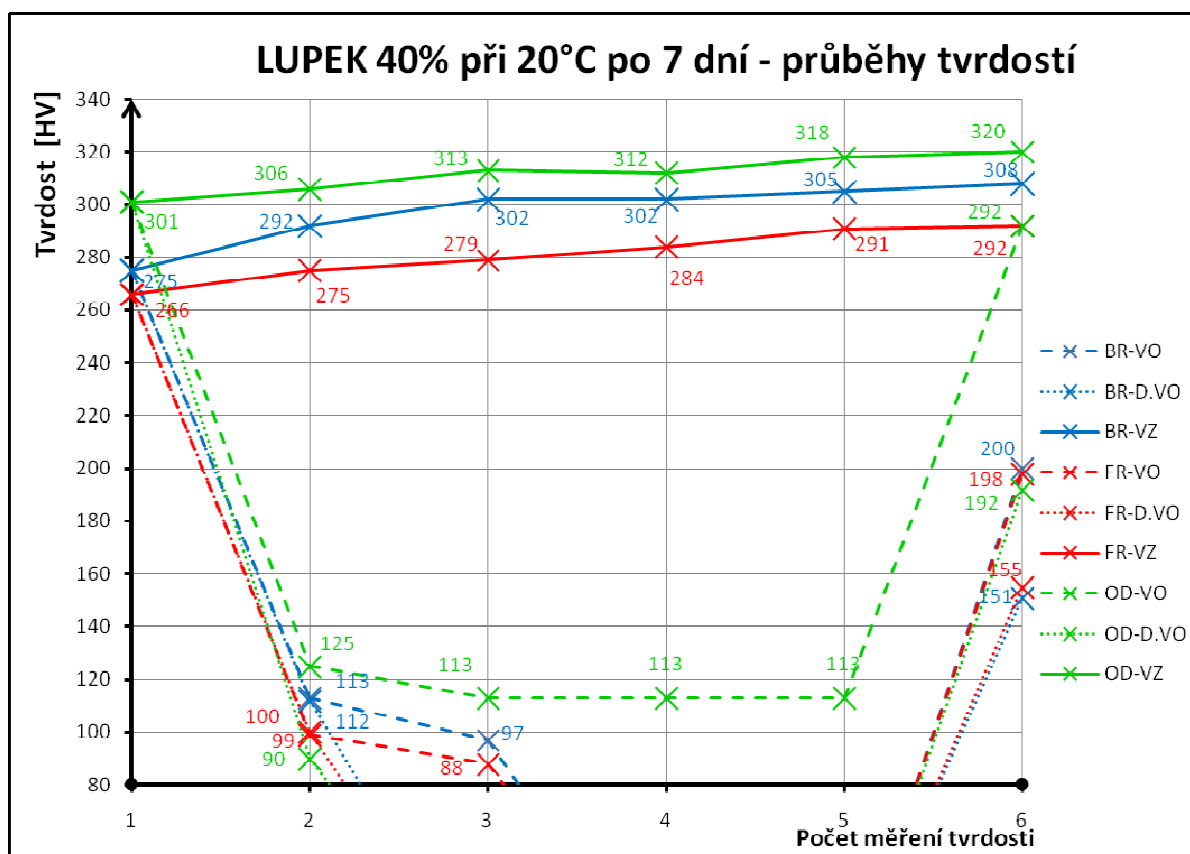
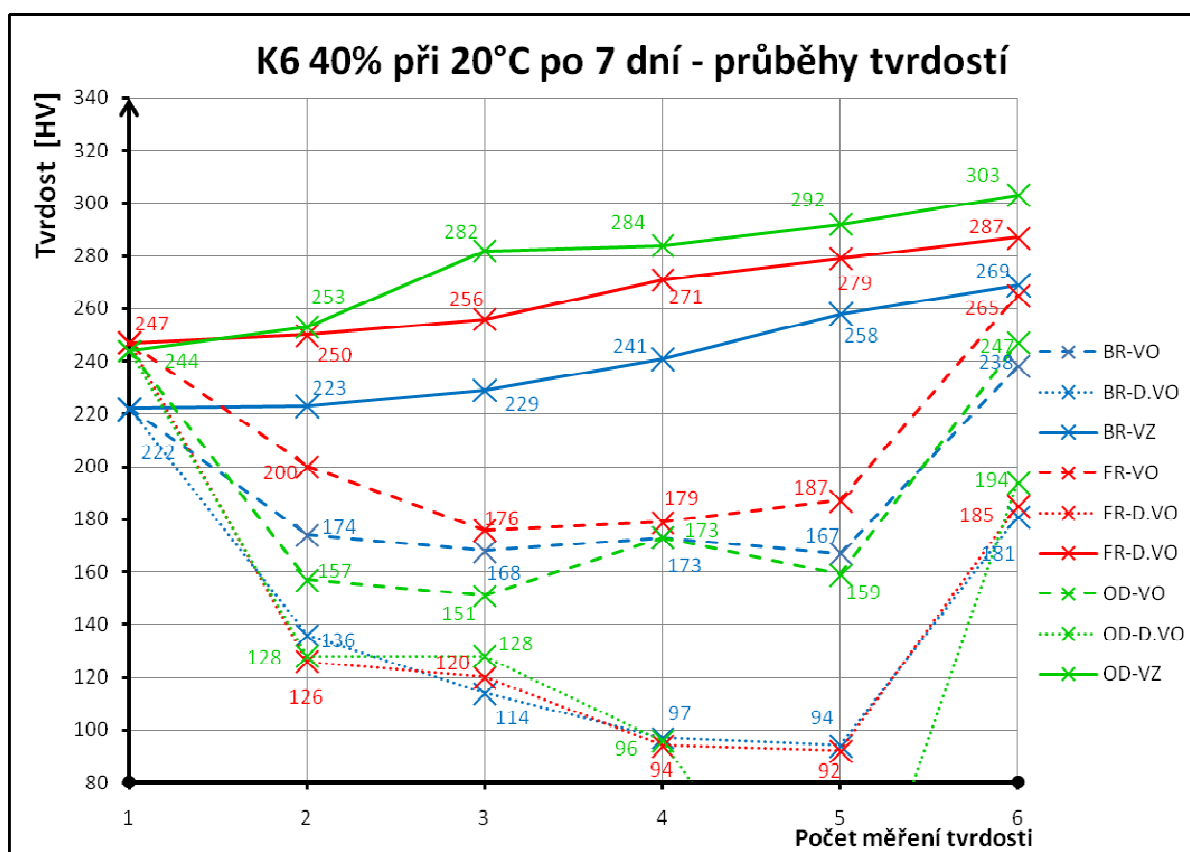




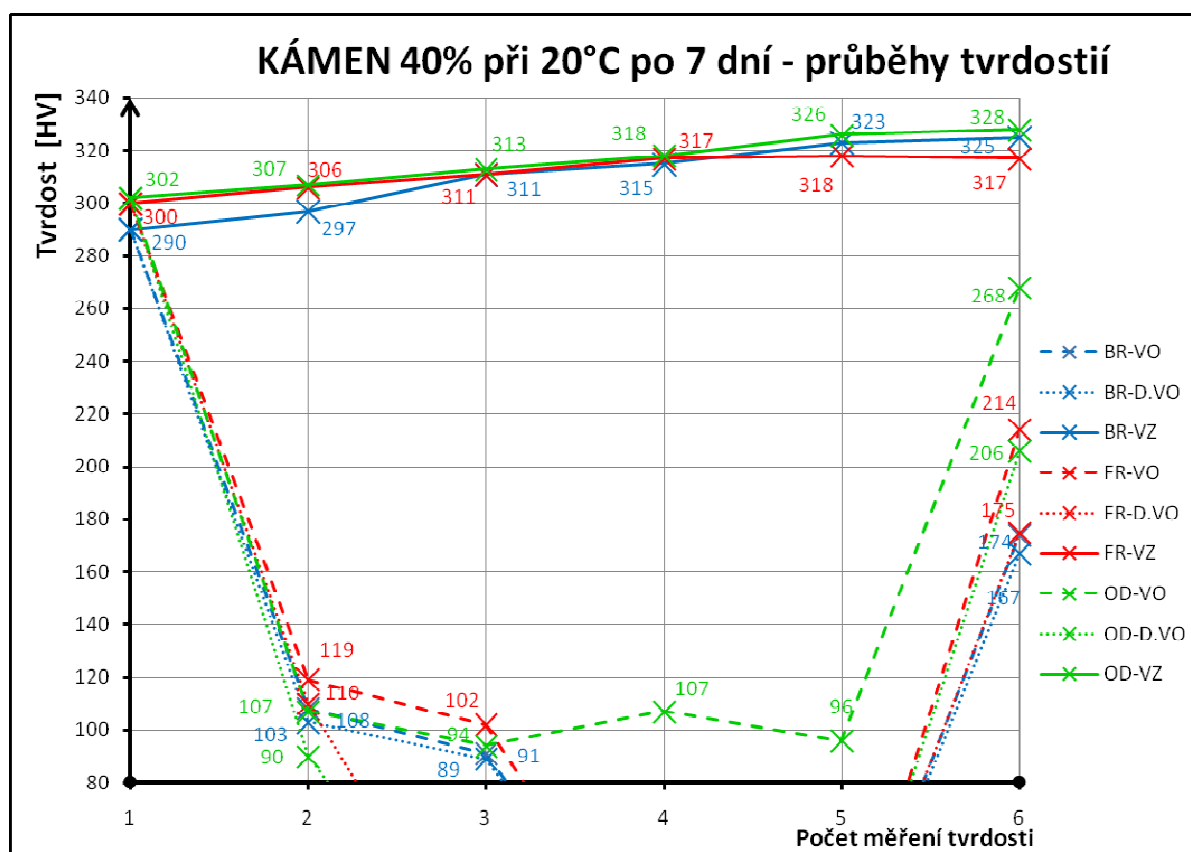




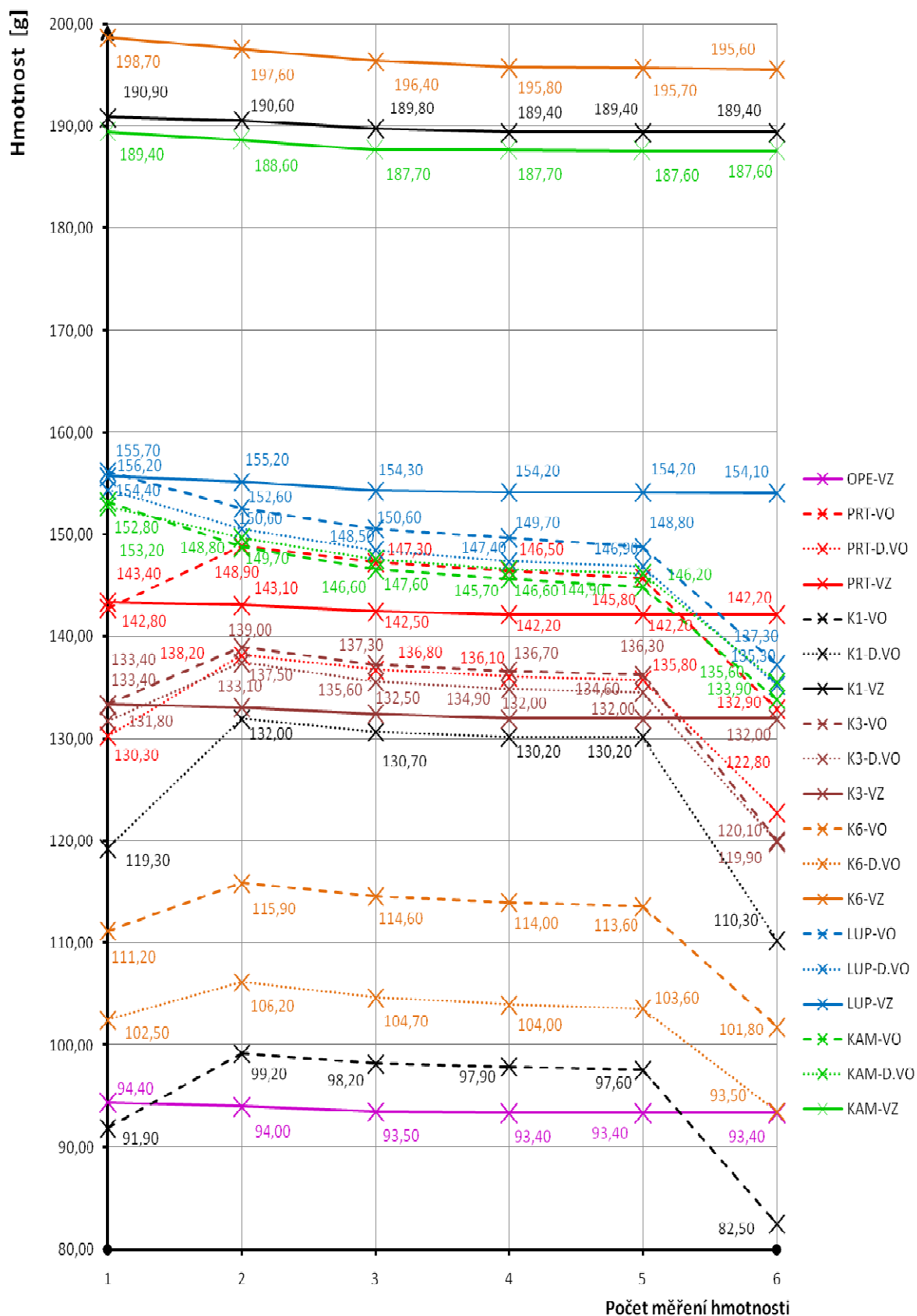






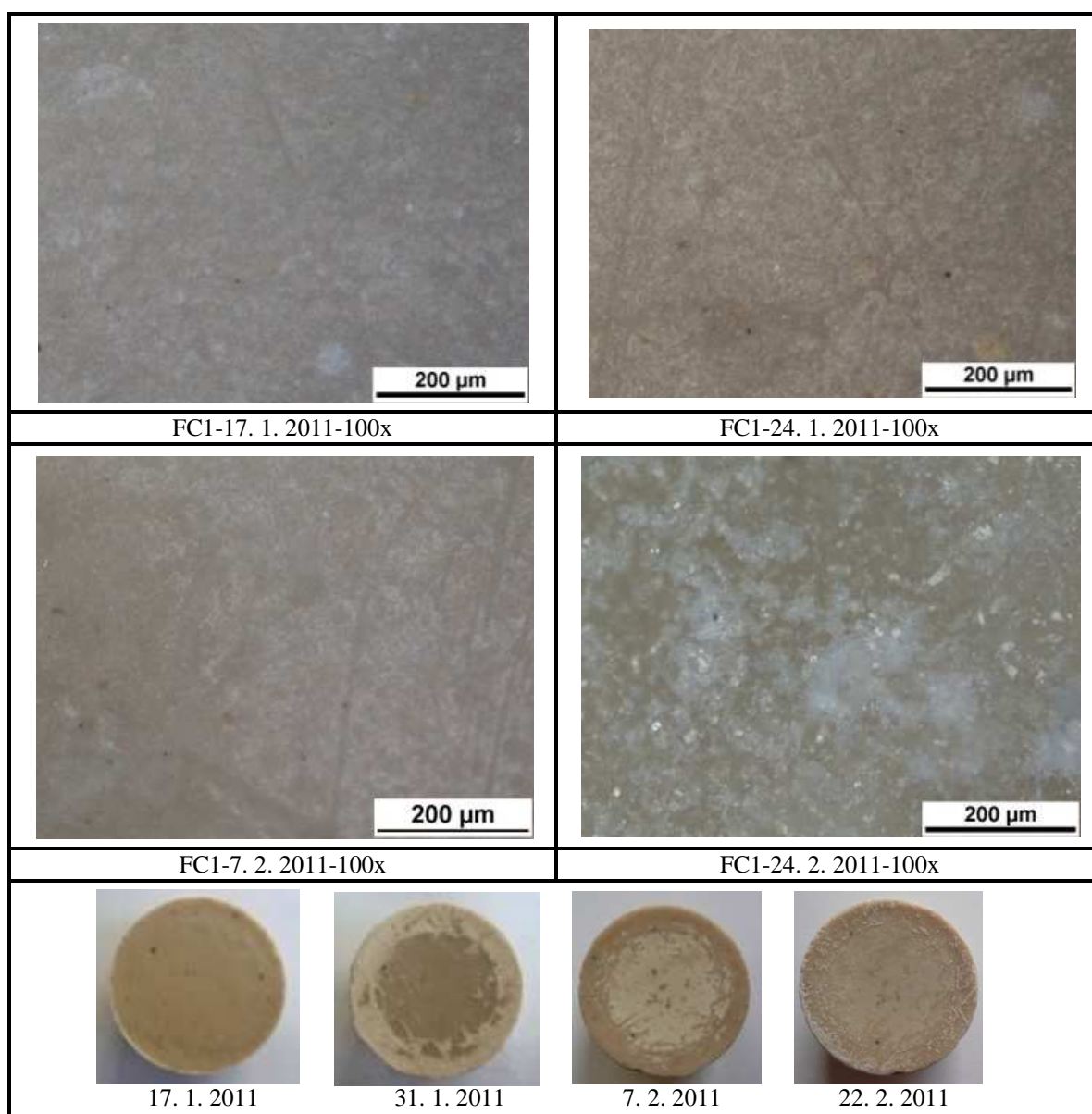


### Průběhy hmotností vzorků vytvrzovaných při 20°C po 7 dní



## 8.2. Zrání geopolymery FC-1

### Geopolymer FC-1 - vytvrzovaný při laboratorní teplotě 20°C po 6 - 7 dní



Tab. 8.2.1. Snímky odlitého povrchu z mikroskopu a pohled okem po dobu zrání Lepidla FC-1.

FC-1:							
Prvek	O	Al	Si	P	K	Ca	Zr
Atom [%]	70,04	2,08	21,52	0,71	5,26	0,08	0,30

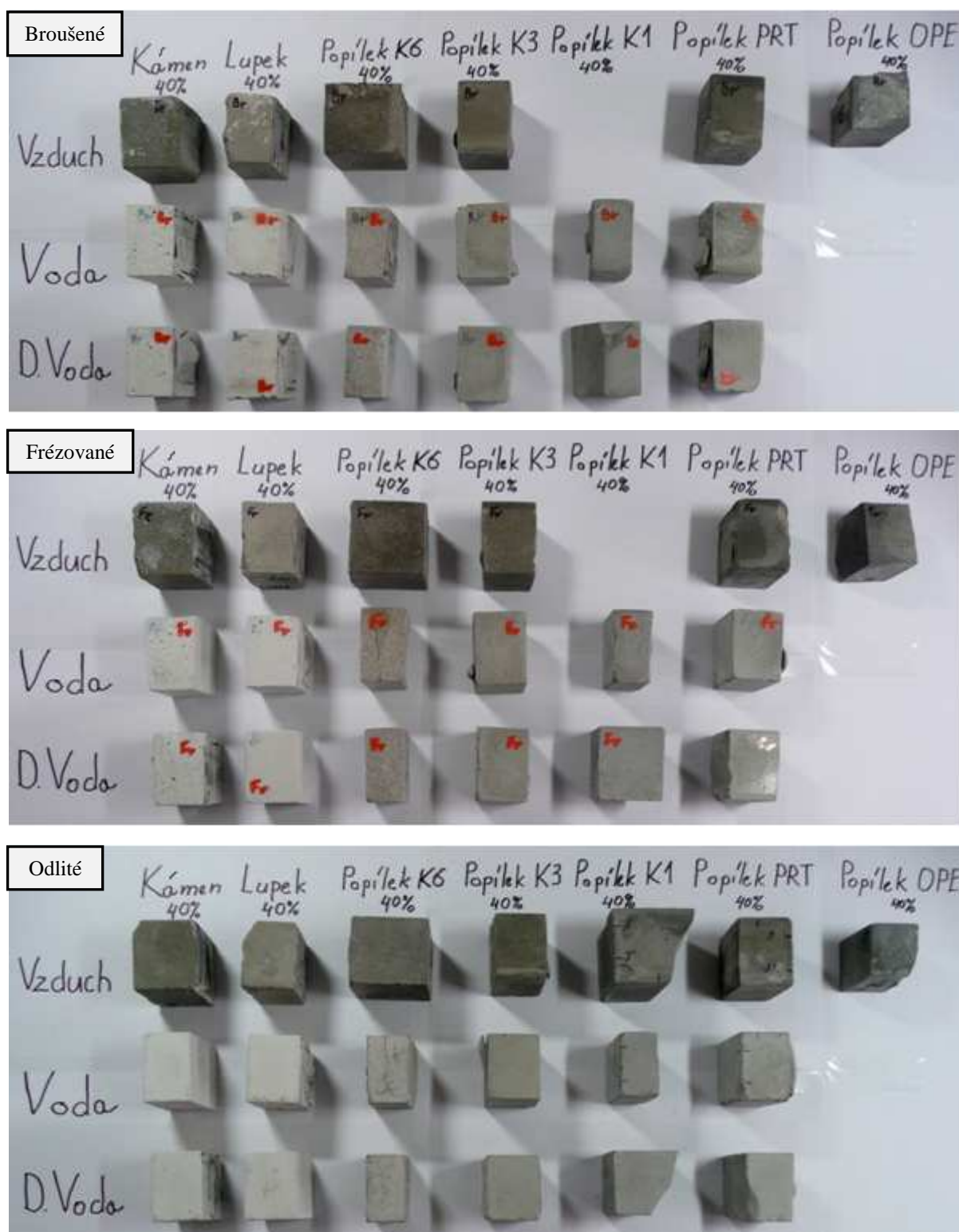
Tab. 8.2.2. Chemické složení FC-1.

### 8.3. Barva povrchů po vysušení



Obr. 48. Povrchy vzorků po vysušení, vzorky jsou vytvrzované při 60°C po 24 hodin.





Obr. 49. Povrchy vzorků po vysušení, vzorky jsou vytvrzované při laboratorní teplotě po 7 dní.

#### 8.4. Doplnující fotodokumentace + elektronická podoba práce

Tato příloha je uložena na příloženém DVD.